Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова
Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГРЕБЕНЧУК СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК [624.074.43:624.012.35](088.87)

ДИСЕРТАЦІЯ

РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АНІЗОТРОПНИХ ОБОЛОНОК

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди
192 - – будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

С.С. Гребенчук

Науковий керівник: Гапонова Людмила Вікторівна,
кандидат технічних наук, доцент

Харків - 2018

АНОТАЦІЯ

Гребенчук С.С. Раціоналізація параметрів залізобетонних анізотропних оболонок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2018.

У представленій роботі досліджено деформований стан анізотропних конструкцій для будівництва монолітних залізобетонних будівель промислового і цивільного призначення, а також різних споруд. В роботі виконані чисельні дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямах.

Зміст дисертації. У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, що вирішується, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність результатів роботи, а також наведено її загальну характеристику.

Перший розділ присвячено конструктивним особливостям відомих залізобетонних полегшених оболонок, принципам моделювання та методам розрахунку анізотропних оболонок, технологічним принципам виготовлення полегшених залізобетонних оболонок. Особливу увагу приділено експериментальному моделюванню випробовувань слідкувальним навантаженням.

Незважаючи на численні роботи у даному напрямку, на сьогодні, нажаль, відсутні роботи нелінійного чисельного дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямах. В наведених літературних джерелах існує достатньо обмежена інформація щодо результатів експериментальних досліджень анізотропних залізобетонних оболонок. У зв’язку з чим, а також з

метою поповнення цієї інформації, на базі проведеного аналізу зроблені висновки і сформульовані завдання справжнього дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено формуванню конструкцій оболонок різної гауссової кривизни, та вивченню напружено-деформованого стану залізобетонних анізотропних оболонок. Відмінною особливістю конструкції є використання всередині монолітного залізобетонного елемента вкладиша-пустотоутворювача. В роботі побудовано тривимірну скінченно-елементну модель, що дозволяє оцінювати напружено-деформований стан конструкцій різної гауссової кривизни розглянутого типу. В рамках цього дослідження, чисельна реалізація здійснена в середовищі ПК «ANSYS» (ліц. № 01008608).

У третьому розділі представлена постановка і реалізація завдання раціоналізації конструктивних параметрів запропонованих залізобетонних оболонок. В якості критерію для даної задачі приймається енергетичний принцип, згідно з яким вважається, що з усієї безлічі можливих значень шуканих параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягне нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів, що описують систему, тобто**:**

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \quad k = 1,2...,\infty \tag{1}$$

де k - номер варіанта порівняння; $\alpha \in$ M, M - область допустимих значень геометричних параметрів.

Реалізація підходу, у даному випадку, передбачає побудову взаємозв'язку між величиною енергії деформації системи і одного або групи геометричних параметрів. Запропонована процедура дозволяє в автоматичному режимі вибудовувати взаємозв'язок між ПЕД системи і будь-яким геометричним параметром, що описує її.

В якості інструментарію для вирішення поставленого завдання використовувалася зв'язка програмних продуктів компанії Autodesk. Основоположним тут є скрипт, написаний в середовищі візуального програмування Dynamo, який дозволяє автоматично формувати геометрію оболонки шляхом завдання всіх необхідних параметрів.

Визначен взаємозв'язок у конструктивно-анізотропної оболонки між ПЕД системи і зовнішніми і внутрішніми раціональними параметрів: при величині кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі. Отримані результати зовнішніх параметрами верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень стріли підйому H і максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки. Визначено, що для заданих умов при стрілі підйому $H \approx 3{,}8$ м ПЕД досягає нижньої межі.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням напружено-деформованого стану моделей оболонок при випробуванні їх гідравлічним методом. Проведення експерименту гідравлічним методом анізотропних оболонок виконувалося рівномірно-розподіленим навантаженням на всій поверхні оболонок, 1/2 та 1/3 циліндричної оболонки і 1/2, 1/4 і 1/8 на сферичній оболонці. Випробування носили неруйнівний характер.

Перед початком проведення вимірювань деформацій випробовувані конструкції були повністю навантажені рівномірно-розподіленим навантаженням впродовж доби з навантаженням 1 т/м^2 для ліквідації усадочних деформацій фундаменту стенду. Випробування проводилися послідовно, для отримання статистичних даних. Кожна схема навантаження-розвантаження виконувалася 6 разів.

Дослідження виконувалися запропонованим методом натурних випробувань плит і оболонок, шляхом впливу на їх поверхню тиском стовпа рідини, що заключається у встановленні випробуваного зразка на опору, спорудженні безпосередньо над ним басейну, обмеженого встановленими по контуру зразка

щитами і розділеного за допомогою перегородок на окремі частини, та заповненні цього басейну водою. Перегородки розташовують таким чином, що вони утворюють чарункову систему розподілу навантаження на будь-яку криволінійну поверхню випробуваного зразка, після чого встановлюють в чарунки гідроізолюючі поліетиленові футляри, дно яких безпосередньо контактує з поверхнею випробуваного зразка, і заповнюють їх водою, з можливістю прикладання гідравлічного тиску послідовно, зосереджено або ступенево до будь-якої частини або всієї поверхні випробуваних плит і оболонок різної гауссової кривизни.

Для визначення якісного та кількісного характеру деформування об'єкта дослідження здійснювалися виміри переміщень циліндричної оболонки в 25-ти точках. При цьому, з огляду на складність конфігурації конструкції, що в свою чергу зумовило появу як вертикальних, так і горизонтальних переміщень досліджуваної поверхні оболонки під дією вертикального навантаження вимірювання переміщень виконувалося в двох напрямках.

Система навантаження, система вимірювання, розроблений і запатентований метод випробувань плит і оболонок різної гауссової кривизни в комплексі дозволили вирішити в процесі випробувань наступні завдання: підтвердити отримані теоретичні дані експериментальним шляхом та оцінити деформований стан залізобетонних анізотропних оболонок. Отримані дослідження наводять, що максимальна розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями переміщень конструктивно анізотропних оболонок від рівномірно-розподіленного навантаження склала 15%-17%.

Крім досліджень НДС оболонок, було проведено дослідження оцінки вогнестійкості конструктивно-анізотропних залізобетонних конструкцій, яке проводилось у вигляді чисельного експерименту, що моделює роботу конструкції при односторонньому нагріванні по режиму стандартної пожежі. Виконані розрахунки температурних полів для 30, 60, 90, 120, 180 і 240 хв. При

аналізі чисельного експерименту поведінки конструкції при впливі на неї стандартної пожежі побудовано тривимірна СЕ модель конструктивної системи, яка дозволила вирішувати температурну задачу в нестаціонарних умовах. Чисельний аналіз температурних полів анізотропних оболонок в нестаціонарних умовах позволив оцінити їх вогнестійкість, яка дорівнює REI 60.

У п’ятому розділі проведено чисельне дослідження НДС складної архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса, виконаної з важкого конструкційного бетону з вкладишами з пінополістиролу. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів в спеціалізованих програмних комплексах з додатковою обробкою вихідних даних. Наведено методику аналізу НДС великих об'ємних СЕ моделей будівельних конструкцій з урахуванням виникнення концентраторів напружень і можливості появи, вироджених СЕ в результаті автоматичної тріангуляції. Вирішена задача порівняння НДС конструкції, модель якої виконана з об'ємних скінченних елементів, в ПК «Ansys» і ПК «ЛІРА-САПР».

Об’єктом впровадження стали плити перекриття нежитлової будівлі по пл. Павлівській, 4 в м. Харкові.

Ключові слова: напружено-деформований стан, математичне моделювання, раціоналізація конструктивних параметрів, залізобетонна анізотропна оболонка.

ABSTRACT

Hrebenchuk S.S. Rationalization of the parameters of reinforced-concrete anisotropic shells. – Qualification Scholarly Manuscript.

Ph.D. Thesis in Engineering Science in the specialty 05.23.01 “Building structures, houses and facilities” (192 – Construction and civil engineering). –

Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The present Paper researches the deformed condition of the anisotropic constructions for the site-cast concrete buildings for the industrial and civil purposes. The work provides numerous analyses of the two-facial anisotropic shells with the ribs in different directions.

Content of Thesis. The **Introduction** provides the grounding of the topicality of the issue considered, formulates the object and objectives of the research, scientific novelty and practical value of the Thesis results, and provides its general characteristics.

The first chapter deals with the constructive peculiarities of the well-known reinforced-concrete light shells, principles of modeling and methods of calculating the anisotropic shells, technological principles of producing the light reinforced-concrete shells. Special attention was given to the experimental modeling of the testing through the follower load.

Despite numerous researches in this sphere, as of today, unfortunately, there are no works of non-linear numerical investigation of the two-facial anisotropic shells with the ribs in different directions. The references provided contain quite limited information as to the results of the experimental investigations of the anisotropic shells. In connection with this, and also for the purpose of complementing this information, based on the analysis conducted, the conclusions were drawn and the tasks of the actual research were formulated.

Second chapter of the Dissertation deals with the formation of the shells constructions with different Gaussian curvature, and studying the stress-strain behavior of the reinforced concrete anisotropic shells. The differentiating peculiarity of construction is the use of the core drivers inside the monolithic reinforced concrete element. The work provides the three-D finite element representation which allows assessing the stress-strain behavior of the Gaussian curvature constructions of the

type considered. Within this research, the numerical realization was conducted in ANSYS PC environment (Lic. No. 01008608).

The third chapter provides the formulation and realization of the task of constructive parameters rationalization of the suggested reinforced concrete shells. The energy principle is taken as a criterion for this task, according to which it is believed that out of numerous possible values of the searched parameters of the system with the constant amount of material, number of external and internal connections, the strain potential energy (SPE) after the reconstruction will reach the lower limit on the rational connection of the geometrical parameters describing the system, i.e.**:**

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \qquad k = 1,2\ldots,\infty \tag{1}$$

where k – is the comparison variant number; α ∈ M, M – geometrical parameters tolerance range.

In this case, the approach realization presupposes the construction of interconnection between the system energy deformation value and one or group of the geometrical parameters. The suggested procedure allows automatic establishment of the connection between the system SPE and any geometrical parameters which describes it.

Autodesk software bunch was taken as an instrumentarium for the solution of the task set. The key role here belongs to the script recorded in the Dynamo visual programming, which allows automatic formation of the shell geometry through specifying all necessary parameters of {x}.

The determined interconnection of the rational parameters of the constructive anisotropic shell between SPE of the system of internal and external rational parameters: with ribs step value of about l ≈ 1000 mm SPE reaches the lower limit. The obtained results of the external parameters are verified through the analysis of the frequencies of the systems natural vibration frequencies for all values of rise H

and maximum shell bearing capacity (q_{max}). It was determined that for the conditions at the camber of arch H ≈ 3,8 m SPE reaches the lower limit.

The fourth chapter is dedicated to the experimental research of the deformed conditions of the shell models during their testing using the hydraulic method. Conducting of experiment using the hydraulic method of anisotropic shells was used through the evenly distributed load on the whole surface of shells, 1/2 and 1/3 of the cylindrical shell and 1/2, 1/4 and 1/8 on the spherical shell. The tests were non-destructive.

Before conducting the measuring of deformations the tested constructions have been fully loaded with the evenly distributed load for 24 hours with the loading of 1 t/m^2 for the liquidation of the stand foundation shrinkage strains. The tests were conducted consistently to receive the statistics data. Each loading/unloading scheme was executed 6 times.

The studies were conducted using the suggested method of in-situ testing of plates and shells, through impact with the hydrostatic pressure on their surface, which is about putting the tested sample on the support, constructing the pool right above it limited by the shields installed along the outline of the tested sample and separated using the partitions and filling this pool with the water. The partitions shall be located so that they form the cellular load distribution system on any curved surface of the tested sample, after which the hydro-isolating polyethylene cases shall be installed into the cells, and the bottom of the former directly contacts with the surface of the tested sample and shall be filled with the water, with the possibility of consecutive, focused or gradual application of the hydraulic pressure to any part or the whole surface of the tested plates and shells of different Gaussian curvature.

To determine the qualitative and quantitative nature of the research object deformation the measurements were conducted of the cylindrical shell shifts in 25 points. Besides, with regard to the construction configuration complexity which in its turn caused the appearance of both vertical and horizontal shifts of the researched

shell surface under the impact of vertical loading, the premises measuring was conducted in two directions.

The loading system, the measuring system, developed and patented method of testing the plates and shells of different Gaussian curvature in complex allowed solving the following tasks in the process of testing: confirm the received theoretical data using the experimental way, assess the deformed condition of the reinforced-concrete anisotropic shells. The results obtained demonstrate that maximum detergency between the theoretical and experimental values of premises of the constructively anisotropic shells from the evenly distributed load amounted to 15%.

Apart from the research of SPE shells, the analysis was conducted of the assessment of the fire-resistance of the constructively anisotropic reinforced concrete structures which was conducted in the form of the numerical experiment which molds the work of the construction during the one-sided heating in the standard fire mode. The conducted calculations of the temperature fields for 30, 60, 90, 120, 180 i 240 min. When analyzing the numerical experiment of the construction behavior during the impact of the standard fire on it, the standard three-dimensional structural system SOS model was created which allowed solving the temperature task under unsteady conditions. The numerical analysis of the temperature fields of the anisotropic shells under unsteady conditions allowed assessing their fire-resistance which is equal to REI 60.

The fifth chapter provides the numerical analysis of the Stress-Strain Condition (SSC) of the complex architectural and compositional structure in the form of the Mobius bend made of the heavy construction concrete with the styrofoam inserts. The SSC analysis was conducted using the finite elements method in the specialized software complexes with the additional processing of benchmark data. The SSC analysis method was provided of the big three-D FE models of the building structures with regard to the appearance of the stress raisers and possibility of the appearance of the SE degenerated as a result of the automatic triangulation. The task

was solved of the comparison of SSC structure, the models of which was made of the three-D finite-elements, at Ansys and LIRA-SAPR SC.

The object of introduction was represented by the non-residential building concrete floor slabs in 4 Pavlivska sq., in Kharkiv.

Key words: stress-strained condition, mathematic modeling, rationalization of the constructive parameters, reinforced-concrete anisotropic shell

Список публікацій здобувача

1. Гапонова, Л.В. Рішення температурної задачі для неоднорідної багатошарової конструкції / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць «Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві». – ЛНТУ. – 2016. – Вип. 5. – С. 199-214.

2. Гапонова, Л.В. Оценка огнестойкости конструктивно-анизотропной железобетонной плиты / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, С.С. Гребенчук // Міжвідомч. наук.-техн. зб. (технічні науки) «Будівельне виробництво». – Київ, 2017. – № 62/1. – С. 57-63.

3. Гапонова, Л.В. Експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованого стану сферичної оболонки покриття /Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 157. – С. 102-113.

4. Gaponova L.V. Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell / L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk // Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering / Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University – 1(48)` 2017. – С.108-120.

5. Гапонова, Л.В. Обследование и анализ архитектурно-конструктивных особенностей памятника архитектуры в городе Харькове / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук, А.С. Константинов, Д.В. Чибаров // НВБ, 2017. – Т. 88. – № 2. – С. 124-131.

6. Гапонова, Л.В. Напряженно-деформируемое состояние архитектурно-композиционного комплекса в форме ленты Мебиуса / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 229-237.

7. Гапонова, Л.В. Архитектурно-композиционный комплекс в форме ленты Мебиуса // Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А Калмыков, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 337-350.

8. Гребенчук, С.С. Теплоаккумулирующие ограждающие конструкции // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» ХНУМГ імені О.М. Бекетова м. Харків, 23 жовтня – 22 листопада 2013 р. – С.202-203.

9. Babaev, V. N. Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell / V.N. Babaev, V.S. Shmukler, S.H. Feirushah, L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk, O.A. Kalmikov // 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. – Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, 2016. – Iraq. p. 42-49.

10. Oleg Kalmykov. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July 2017.

11. Oleg Kalmykov. Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July 2017.

12. Гапонова, Л.В. Напружено-деформований стан циліндричної оболонки / Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук // Комунальне

господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – Вип. 126. – С. 9-18.

13. Гребенчук, С.С. Экспериментальные исследования железобетонных анизотропных оболочек / Гребенчук С.С. // Журнал «Бетон и железобетон в Украине». – Полтава, 2017. – С. 18-26.

14. Емельянова, И.А. Технологические особенности возведения сооружений криволинейной формы по строительной системе «Монофант» с использованием малогабаритного оборудования способом мокрого торкретирования / И.А. Емельянова, С.А. Гузенко, Д.О. Чайка, С.А. Бугаевский, Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 323-330.

15. Пат. 113750 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. Стенд для натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер,С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № u 201608761; заявл.12.08.16; опубл. 10.02.17. Бюл. № 3.

16. Пат. 115153 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. – Спосіб натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № u 201608763; заявл. 12.08.16, опубл. 10.04. 17, бюл. № 7/2017.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ……2

Список публікацій здобувача……12

ЗМІСТ……..15

ВСТУП…….……...17

1 АНАЛІЗ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ……...22

1.1 Створення тонкостінних конструкцій…….…..22

1.2 Конструктивні особливості відомих залізобетонних полегшених оболонок……..…..….24

1.3 Принципи моделювання та методи розрахунку анізотропних оболонок…….....28

1.4 Експериментальне моделювання……...….38

1.5 Технологічні принципи виготовлення полегшених залізобетонних оболонок……..41

1.6 Висновки до розділу 1…….……..46

2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АНІЗОТРОПНИХ ОБОЛОНОК, ПРОПОНОВАНОГО ВИДУ……..47

2.1 Формування топології оболонок…….....47

2.2 Структура пропонованих конструкцій…….....48

2.3 Принципи армування…….....49

2.4 Математичне моделювання, його особливості, результати та їх аналіз.....51

2.5 Висновки до розділу 2……60

3 РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК, ЯКІ РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ……..61

3.1 Принципи формування ефективних рішень оболонок…….……...61
3.2 Особливості моделювання енергетичного портрету конструкції……..…...61
3.3 Процедури покращення конструктивних характеристик оболонок……..….65
3.4. Висновки до розділу 3…….....78
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК, ЩО ПРОПОНУЮТЬСЯ…….….80
4.1 Мета та задачи експерименту …….....80
4.2 Спосіб для натурних випробувань конструктивно-анізотропних оболонок різної гаусової кривизни ……..…….83
4.3. Система навантаження……86
4.4 Система вимірювання……...92
4.5 Зіставлення теоретичних і експериментальних досліджень……...…..100
4.6 Оцінка несучої здатності конструктивно-анізотропних оболонок……..116
4.7. Оцінка вогнестійкості конструктивно-анізотропних залізобетонних плит……124
4.8. Висновки до розділу 4……...126
5 УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ……128
5.1 Упровадження через проектування…….....128
5.2 Упровадження через будівництво……..139
5.3 Висновки до розділу 5…….144
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ….……..145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……147
ДОДАТКИ……..……...163

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний стан теорії розрахунку залізобетонних конструкцій дає змогу створювати криволінійні конструктивні форми, проектувати й зводити будівлі та споруди, унікальні за своєю архітектурою, з довільним плануванням приміщень, великими прогонами тощо.

Досить актуальним питанням у сучасному будівництві України є створення захисних підземних споруд у вигляді оболонок, які можуть сприймати значні динамічні та статичні навантаження.

Покриття будівель і споруд сприймають значні навантаження, які спричиняють високий рівень напружено-деформованого стану (НДС) системи. Саме тому доцільно розглядати такі види покриття, які могли б сприймати, рівномірно розподіляти й передавати ці навантаження на опори. Для виконання цієї мети найбільше підходять оболонки різної гауссової кривизни, виконані із залізобетону.

Проте пошук раціональних конструкцій оболонок, які сприймають зазначені види навантажень, становить собою досить актуальну, але логічно незавершену проблему.

Крім того, оскільки залізобетон є доволі важким матеріалом, доцільно дослідити способи його полегшення. Одним із таких способів є замонолічування всередину конструкції вкладишів-пустотоутворювачів із пінополістиролу, які водночас формують ребра жорсткості оболонки. Водночас, надаючи ребрам жорсткості певної геометрії (за рахунок змінювання форми вкладишів), можна забезпечити найбільш прийнятний розподіл зусиль, який являє собою задану несучу здатність при обмеженому використанні матеріалу.

Резюмуючи перераховане, можна констатувати, що побудова методології формування внутрішньої геометрії з подальшою експериментальною верифікацією є своєчасною й необхідною для практики будівництва проблемою. Її вирішення дозволить підвищити ступінь надійності подібних

систем, їх довговічність, а також за рахунок раціоналізації їхніх конструктивних параметрів реалізувати мінімізацію витрат матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконано згідно з планом науково-дослідної роботи ХНУМГ імені О. М. Бекетова у межах держбюджетної теми № 0115U000154 «Розробка та дослідження нової конструктивної будівельної системи багатокритеріальної відповідності» (2015–2016 рр.) і наукової школи «Конструкції та матеріали для житлових і цивільних будівель».

Метою роботи є раціоналізація параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок з урахуванням концепції «конструкція – матеріал – технологія».

Задачі дослідження:

- дослідити принципово новий тип конструкції, що має задану зовнішню й розрахункову внутрішню геометрію;
- математично змоделювати процес деформування конструктивно-анізотропної оболонки за різних типів зовнішніх і внутрішніх впливів;
- експериментально верифікувати отримані теоретичні результати дослідження;
- упровадити результати дослідження.

Об'єкт дослідження – управління напружено-деформованим станом залізобетонних анізотропних оболонок різної гауссової кривизни.

Предмет дослідження – принципи раціонального конструювання, теоретико-експериментальне вивчення й удосконалення характеристик об'єкта дослідження.

Методи дослідження. У роботі використано класичні й чисельні методи механіки деформованого тіла, а також теоретичний метод, що базується на нових енергетичних принципах. Унаслідок цього створено програмні продукти – програмні компілятори ітераційного типу, які функціонують на базі

комерційних програмних середовищ, реалізованих на базі методу скінченних елементів. На базі гідравлічного методу й лабораторних випробовувань вихідних матеріалів проведено комплекс експериментальних досліджень залізобетонних оболонок. Заданий метод відрізняє експлуатація сучасних технічних та інформаційних приладів і обладнань.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

Отримав подальшого розвитку:

- принцип конструювання просторових елементів зі складною геометрією.

Уперше отримано:

- модель деформування двопоясних оболонок, що дозволяє шляхом управління напружено-деформованим станом конструкції обґрунтовано визначити фізико-геометричні параметри системи;
- експериментальну інформацію про особливості деформування двопоясних ребристих оболонок, які мають раціональні конструктивні параметри і різну гауссову кривизну.

Удосконалено:

- метод гідравлічного випробування для оболонок різної гауссової кривизни.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- удосконалено метод для натурних випробувань оболонок різної гауссової кривизни;
- запропоновано і створено стенд для натурних випробувань оболонок різної гауссової кривизни;
- упроваджено результати дослідження під час проектування і зведення будівлі за адресою: м. Харків, майдан Павлівський, 4, «Реабілітація нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, подані в дисертації, є самостійними. В опублікованих у співавторстві роботах здобувачеві належить:

[1,2] - огляд літератури, вивчення фізичних властивостей нового типу конструкції; [3,4, 9,12,14] - підготовка експериментальної установки, створення експериментального стенду та проведення експериментальних досліджень; [5] - розробка проектних рішень при визначенні пошкоджень та аналізі архітектурно-конструктивних особливостей будівлі; [6,7] - аналіз чисельних даних результату розрахунків; [10] - проведення пошукових досліджень щодо фізичних властивостей конструктивно-анізотропних конструкцій; [11] - проведення пошукових досліджень і раціоналізація чисельних розрахунків; [15,16] - патентний пошук, пропозиції щодо конструктивних особливостей стиків і проведення випробувань.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались на:

-Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» ХНУМГ імені О.М. Бекетова (м. Харків, 23 жовтня – 22 листопада 2013 р.);

- VI науково-практичній конференції «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві» (м. Харків, 23-24 березня 2016 р.);

- Міжнародній науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (м. Полтава, 4-5 квітня 2016 р.);

- 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016, (April 12–14, 2016) Salahaddin University-Erbil, Kurdistan, Iraq;

- I Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні» (м. Харків, 6-7 квітня 2017 р.);

- II Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології в будівництві» (м. Київ, 6-7 квітня 2017 р.);

- VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19-21 квітня 2017 р.).

Публікації. Основні положення дисертації та результати досліджень опубліковані у 16 друкованих працях, із них: 6 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, із яких 4 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз; 1 публікація у колективній монографії, 4 публікації апробаційного характеру, із яких 2 – у виданнях, що індексуються Scopus; 3 додаткові публікації та 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 202 сторінки, зокрема 146 сторінок основного тексту, 9 таблиць, 119 рисунків, а також список використаних джерел із 132 найменувань та 5 додатків на 40 сторінках.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Створення тонкостінних конструкцій

В розділі виконано аналіз концептуальних результатів попередніх досліджень конструктивних особливостей відомих залізобетонних полегшених оболонок, розглянуті принципи моделювання та методи розрахунку анізотропних оболонок, технологічні принципи виготовлення полегшених залізобетонних оболонок. Дослідженнями залізобетонних оболонок займалися такі вчені, як А.Я. Барашиков, В.М. Бондаренко, О.І. Вайнберг, Ю.О. Клімов, Г.А. Молодченко, М.В. Савіцький, Л.І. Стороженко, Г.К Хайдуков, А.А. Гвоздев, В.В. Шугаев,А.Л. Шагін, В.С. Шмуклер [2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 87].

Основні методи розрахунку залізобетонних елементів конструкцій згідно з основними положеннями деформаційної моделі, запропонованої до проекту будівельних норм України викладені у роботах [1, 2].

Чисельними дослідженнями напружено-деформованого стану залізобетону з використанням розрахункових моделей займалися у своїх роботах В.М. Бондаренко [3, 4] О.І. Вайнберг [5], Г.А. Молодченко [6], М.В. Савіцький [7], Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко [8], А. А. Гвоздев, В. Н. Байков, О.Л. Шагін [9, 10].

Питання розрахунку і конструювання збірних залізобетонних просторових перекриттів рамно-шатрового типу, для будівель різного призначення з укрупненной сіткою колон, конструктивні рішення рамно-шатрових перекриттів прольотом 12 м, в залежності від величини проектних навантажень, розглядаються у роботі Шугаєва В. В. [11].

Оригінальними методами, що складають основу сучасної теорії управління

параметрами конструкцій займалися такі вчені, як Н.П. Абовський [12], А.С. Городецький [13], М.І., Рейтман [14], А.В. Перельмутер [15], А.Л. Гольдененвейзер [16], С.П. Тимошенко [17], О.Р. Ржаніцин [18], Chien Wei-Zang [19], Reissner E. [20, 21], Shanley F. [22] і багато інших авторів.

Основні ідеї та тенденції в регулюванні напружено-деформованого стану розглядаються у роботах таких відомих вчених, як А.В. Перельмутер [15] та В. Новацький [24].

Б.В. Горенштейн у своїй роботі провів детальний аналіз методів розрахунку та проектування залізобетонних просторових покриттів [25].

Суттєвий вклад в аналіз теоретичних робіт, присвячений розрахунку оболонок, проведено у роботах Ф. Дишингера [26] - вперше виконан розрахунок сферичної оболонки на основі безмоментної теорії. Найраціональнішими, такими що фактично не мають меж застосування, є просторові конструкції у вигляді сферичних куполів, які становлять собою опуклу положисту або звідну оболонку на круглому, еліптичному та полігональному плані. Вони широко застосовуються для зведення із залізобетону будівель житлового та громадського призначення: офіси, школи, церкви, спортивні арени, театри, ангари, будинки або житлові комплекси тощо.

Якісне дослідження властивостей напружено-деформованого стану оболонок в залежності від умов закріплення її країв і знака кривизни серединної поверхні проведено А.Л. Гольденвейзером. Він у своїх роботах розглядав напружений стан сферичної оболонки як сумму напружених станів-моментного, безмоментного та крайового ефекту. Велику увагу приділено обґрунтуванню теорії оболонок, оцінці її похибок і обговоренню шляхів уточнення.

1.2 Конструктивні особливості відомих залізобетонних полегшених оболонок

Перекриття-оболонка - будівельна конструкція перекриттів будівель і споруд. В архітектурній практиці використовуються випуклі, висячі, сітчасті та мембранні оболонки з залізобетону, металів, дерев, полімерних, тканинних та композиційних матеріалів.

Перекриття-оболонки використовували відомі архітектори Антоніо Гауді, П'єр Нерві, Оскар Німейєр, Ээро Сааринен, Кендзо Танге, Бакминстер Фуллер, Ніколас Гримшоу, Сантьяго Калатрава, Заха Хадід. Набули поширення в прогресивній архітектурі перекриття-оболонки протягом останніх двох десятиліть унаслідок упровадження у практику розрахування конструкцій за допомогою комп`ютерів і появи нових будівельних матеріалів і технологій [27]. Стальові сітчасті гіперболоїдні оболонки з ромбовидною решіткою вперше використовувалися в архітектурі інженера і архітектора В.Г.Шухова в 1896 р. (рис.1.1).

Рисунок 1.1. Будівництво перших в світі сталевих сітчастих оболонок-перекритів двоякої кривизни конструкції В. Г. Шухова на Виксунскому металургійному заводі, Викса, (1896р).

Перекриття-оболонки поділяються за матеріалами, з яких зводяться: залізобетонні (зокрема із застосуванням легких та інших бетонів); комбіновані, що складаються із залізобетонної плити і металевих діафрагм або бортових елементів; комплексні, що складаються із залізобетонної просторової конструкції та ефективних теплоізоляційних, гідроізоляційних та інших матеріалів; армоцементні та із сталефібробетону (рис.1.2-1.5).

Рисунок 1.2. Вітрилообразні перекриття-оболонки Сіднейського оперного театру, архітектор Йорн Утзон (1973р)

Рисунок 1.3. Пекінський оперний театр французського архітектора Поля Андре,(2007р.)

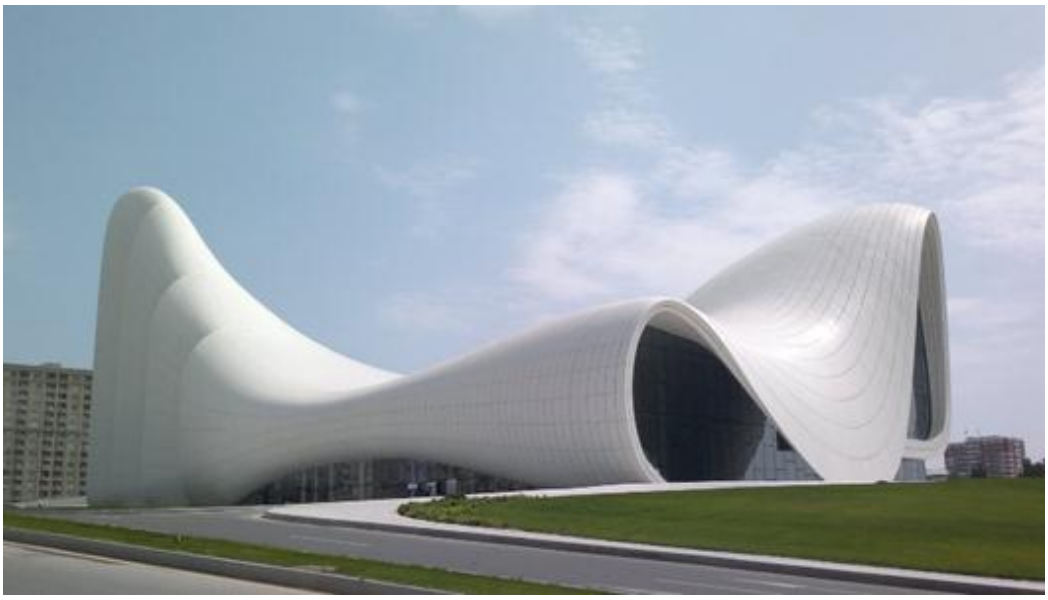


Рисунок 1.4. Центр Гейдара Алієва, Баку, Азербайджан -ірако-британський архітектор і дизайнер арабського походження, Заха Мохаммад Хадід, представниця деконструктивізму(2012р.).

Рисунок 1.5. Зал ім. Кресге в Массачусетському технологічному інституті, архітектор Ээро Сааринен, (1954р.).

Схеми тонкостінних просторових конструкцій покриттів і перекриттів приведені на рис.1.6.

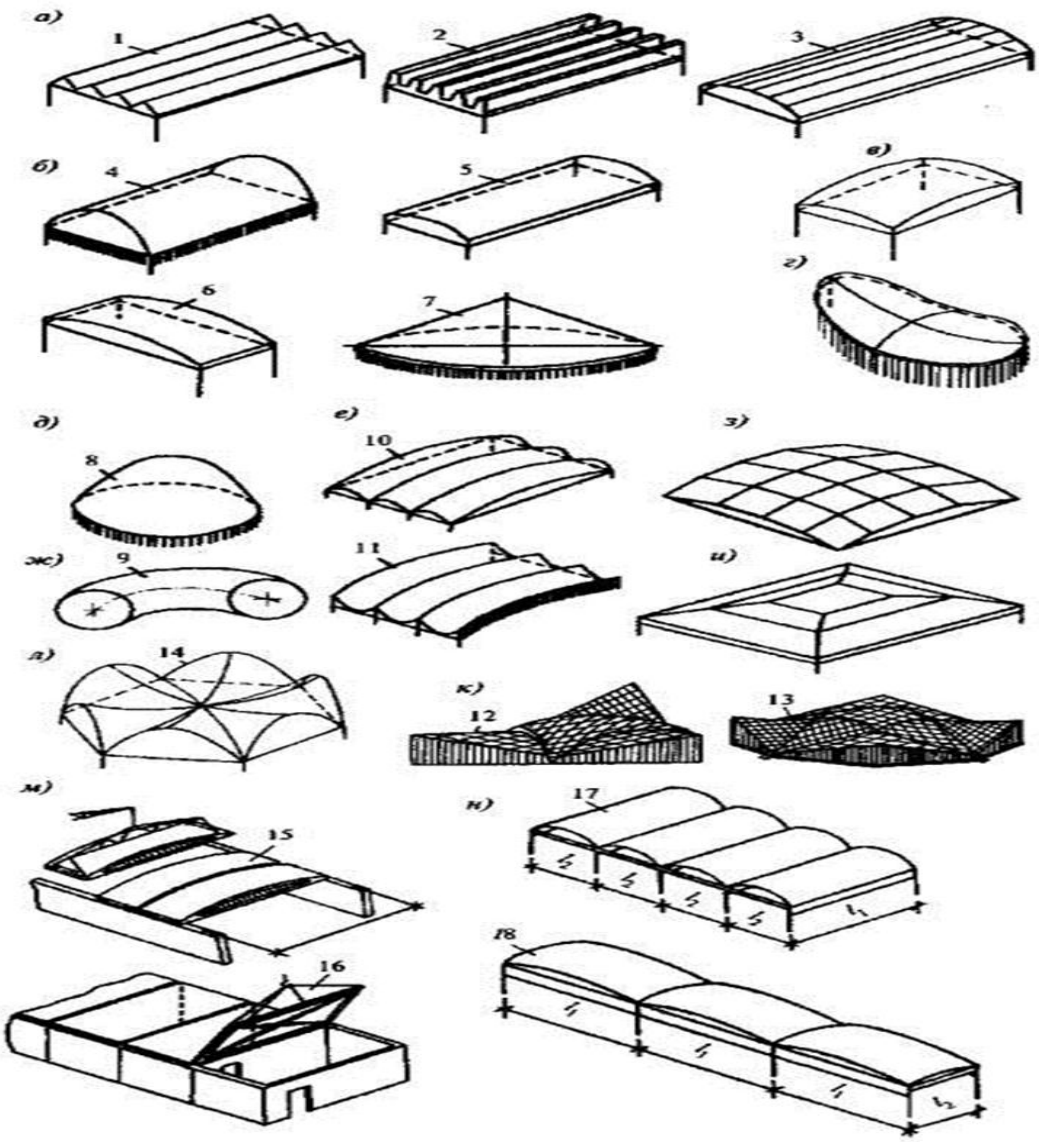


Рисунок 1.6. Схеми тонкостінних просторових конструкцій, покриттів і перекриттів: 1 - балочна складка з трикутним поперечним перерізом; 2 - те ж, з трапецієподібним; 3 - те ж, з склепінчастою (призматичні опуклі складки); 4 - звід-оболонка; 5 - довгі циліндричні оболонки, 6 - то ж, короткі; 7 - конічна оболонка; 8 - купол; 9 - тороїдальна оболонка; 10 - бондарним склепіння; 11 - гіперболічні оболонки; 12 - покриття з трикутним планом з оболонок позитивної та негативної гауссовой кривизни; 13 – те саме, з полігональним планом; 14 - покриття із складових гіпару; 15 - панелі-оболонки КЖС; 16 - вспарушенні плити-оболонки; 17 - багатохвильові оболонки; 18 - багатопрогонні оболонки

1.3. Принципи моделювання та методи розрахунку анізотропних оболонок

Дослідження присвячені конструктивним особливостям відомих залізобетонних полегшених оболонок, принципам моделювання та методам розрахунку анізотропних оболонок, технологічним принципам виготовлення полегшених залізобетонних оболонок. Особливу увагу приділено експериментальному моделюванню випробовувань слідкувальним навантаженням.

Незважаючи на чисельні роботи у даному напрямку [28, 29, 30, 31] на сьогодні нажаль відсутні роботи нелінійного чисельного дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямах. В наведених літературних джерелах створені теорії і наведені інженерні методи розрахунків оболонок [32, 33].

У роботі [34] виконано динамічний розрахунок напівсферичних оболонок покриття каркаса будівлі «Зимовий сад» Технопарку РГСУ, розроблена скінченно-елементна модель об'єкта і виконаний розрахунок в програмному комплексі Ліра-САПР.

Для визначення напруженно-деформованного стану конструктивно-анізотропніх оболонок доцільно використовувати метод скінченно-елементного моделювання сучасних програмних комплексів, таких як Ліра-САПР [35].

Демонструя уявлення особливостей моделювання напружено-деформованного стану складних об’єктів не можливо не процитувати А. В. Перельмутера «Робота несучої конструкції багато в чому визначаєтся плечем внутрішньої пари. У сфері воно дорівнює відстані між поясами, в арці - віддалі від замка до затягування, у купола - приблизно відстані між вершиною і опорним кільем. А яке плече внутрішньої пари у оболонки двоякої крівізни на прямокутному плані? Відповідь на це питання вимагає розуміння роботи

конструкції «в цілому», що багато в чому протилежно практикуємому детальному аналізу напружено-деформованого стану. Такий аналіз спрямований на вивчення деталей (відшукання піків напруг, місць з максимальними прогибами і т.п.». [36].

Метод скінченних елементів заснований на дискретизації самого об'єкта, який представляється у вигляді окремих кінцевих елементів[37].

При цьому, упровадженню в практику проектування прямих методів сприяли, з одного боку, способи трактування власне поняття «раціональне рішення», а з іншого - широке використання методу скінченних елементів (МСЕ).

Поняття "раціональна конструкція" вдалося дещо конкретизувати і трансформувати за допомогою цікавих ідей і досліджень Г.В. Василькова і В.С. Шмуклера [38].

Моделюванню геометричних параметрів з урахуванням фрактальної теорії присвячені роботи Б. Мандельброта [39].

В.С. Шмуклер у своїй роботі [40] відзначив, «що для регульованих систем з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків (зовнішні параметри) під дією статичного зовнішнього навантаження - власної ваги, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягає нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів:

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \quad k = 1,2,...\infty, \qquad (1)$$

где U – ПЭД; k - номер варіанта порівняння; $\alpha \in M$;

M – безліч допустимих значень зовнішніх геометричних параметрів.

Положення (1) може бути поширене на випадок присутності безлічі віртуальних завантажень. Зокрема, при компонуванні тонкостінного елементу, що зазнає деформацію вигину кручення, можна обнулити (мінімізувати) крутний момент за рахунок проходження вектора навантаження через центр

вигину, що буде відповідати виконанню (1). Результатом тут буде відмова від формування елементу, що має замкнутий контур, і використання вимог ізоенергетичності стану системи (конструкції), тобто такого при якому:

$$e[\{\bar{x}\}] = const, \tag{2}$$

где e – щільність потенційної енергії деформацій (ЩПЕД);

{x} – вектор внутрішніх параметрів.

Для рішень (наприклад, для залізобетонних або сталезалізобетонних конструкцій) використовуються вкладиші-пустоутворювачі (рис. 1.7). Для металевих елементів, в цьому випадку, доречна установка конструктивів з перемінним перетином і / або використанням металів різних марок.

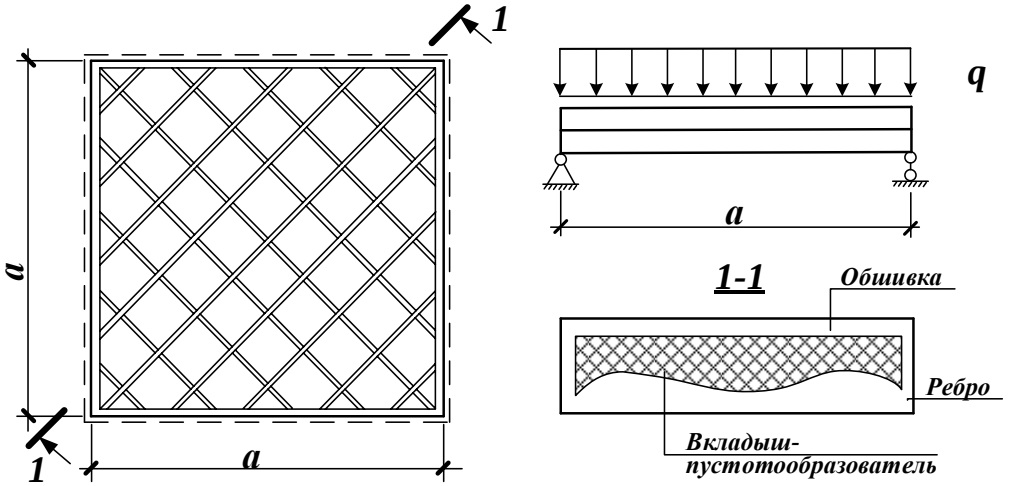


Рисунок 1.7. Оребрена пластина з ребрами змінної жорсткості

$$U_u = \sup U, \tag{3}$$

де U_u - гранична величина ПЕД.

Застосовуючи до (2) ітераційний підхід, який базується на методі адаптивної еволюції (МАЕ), для будь-якого геометричного або фізико-механічного параметра конструкції можна записати [40]:

$$h_{i+1} = h_i [e_i e_{iu}^{-1}]^{\gamma}, \tag{4}$$

де h – геометричний (фізико-механічний) параметр системи;

i – номер ітерації;

$\gamma \in (0,1)$ - характеристика адаптивної еволюції, що відображає швидкість збіжності.

Умови (2) і (4) містять величину граничної щільності потенційної енергії e_u. З цією характеристикою пов'язано поняття нормованого значення щільності потенційної енергії деформації e_n або нормованого потенціалу деформації, необхідного для побудови еталонного рішення (енергетично равнопрочна система). Позначимо величини ЩПЕД, так, що

$$e_n = e_n(e_{nc}; e_{nt}; e_{nsh}), \tag{5}$$

де e_{nc}; e_{nt}; e_{nsh} - нормовані величини ЩПЕД для деформацій розтягування, стиснення і зсуву відповідно.

При цьому, кожну приватну ЩПЕД представимо у вигляді:

$$e_{nc} = \frac{9}{2} K \cdot \varepsilon_0^2 + \int_0^{\varepsilon_{nc}} \sigma_c d\varepsilon_c, \tag{6}$$

$$e_{nt} = \frac{9}{2} K \cdot \varepsilon_0^2 + \int_0^{\varepsilon_{nt}} \sigma_t d\varepsilon_t, \tag{7}$$

$$e_{nsh} = \int_0^{\varepsilon_{nsh}} \tau d\gamma, \tag{8}$$

де $K = \frac{E_0}{3(1-2\cdot\nu)}$ об'ємний модуль деформації;

E_0 – начальний модуль деформації 1-го роду матеріалу;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{3} I_1(T_\varepsilon)$; $I_1(T_\varepsilon)$ – перший інваріант тензора деформацій;

$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c)$; $\sigma_t = \sigma_t(\varepsilon_t)$; $\tau = \tau(\gamma)$ - задані діаграми матеріалу, побудовані для деформацій стиснення, розтягування, переміщення;

$\varepsilon_{nc}; \varepsilon_{nt}; \lambda_n$ - нормовані значення деформацій на стиск, розтяг, зсув.

Перший доданок в (6), (7) являє собою питому потенційну енергію зміни обсягу, а другий - питому потенційну енергію зміни форми.

Тут вважається, що діаграми матеріалів можуть бути отримані безпосередньо з відповідних експериментів, а нормовані значення деформацій представлені виразом:

$$\varepsilon_{nk} = \gamma_k \varepsilon_{ku};\ \gamma_k \in (0,1),$$

де k – ндекс, послідовно приймаючий значення, відповідний деформації стиснення, розтягування, зрушення;

γ_k – статистично обгрунтований коефіцієнт запасу.

Призначаючи різні значення γ_k для різних елементів системи, з'являється можливість управління послідовністю виходу їх з ладу. Дана обставина зумовлює, в тому числі, експлуатацію теорії черг, а також репрезентативне резервування [9].

ε_{ku} – гранична деформативність.

Діаграму деформування матеріалу (рис. 1.8) представимо у вигляді полінома сьомого (непарного) ступеня:

$$\sigma = \alpha_1 \varepsilon + \alpha_3 \varepsilon^3 + \alpha_5 \varepsilon^5 \cdot \alpha_7 \varepsilon^7, \qquad (9)$$

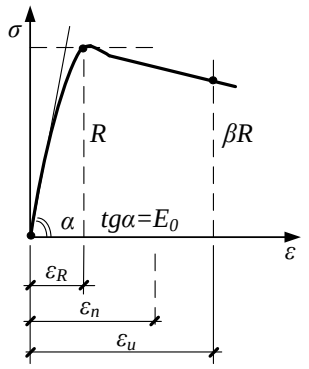


Рисунок 1.8. Діаграма деформування матеріалу

В (9) невідомі коефіцієнти α_1 (j = 1,3,5,7) можна виразити через характеристики діаграми:

$$\{\alpha\}^T = \{E_0; R; \varepsilon_R; \varepsilon_u; \beta\}, \qquad (10)$$

де E_0 – початковий модуль деформацій;

R - межа міцності;

ε_R - деформація, що відповідає межі міцності;

ε_u - гранична деформативність;

β - напруга, відповідна граничній деформативності.

Перераховані характеристики, в загальному випадку, є функціями температури, часу та інших параметрів, що підтверджено значним кількістю досліджень.

Для визначення коефіцієнтів α_j використовуються наступні умови:

$$\begin{aligned} &при\ \ \varepsilon = 0;\ \ \sigma = 0;\ \ \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_0; \\ &при\ \ \varepsilon = \varepsilon_R;\ \ \sigma = R;\ \ \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0; \\ &при\ \ \varepsilon = \varepsilon_u;\ \ \sigma = \beta \cdot R. \end{aligned} \tag{11}$$

Підставляючи (9) в (11) і вирішуючи систему лінійних рівнянь, визначаються коефіцієнти α_j (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1.

Коефіцієнти полінома (9)

Коефіцієнти	Значення
$\alpha_3 \cdot E_0^{-1}$	$\frac{\varepsilon_u^4}{2(\varepsilon_u^2-\varepsilon_R^2)^2}\left[\frac{1}{\varepsilon_R^2}\left(\frac{R}{E_o\varepsilon_R}-1\right)\left(5-7\frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2}\right)-\frac{1}{\varepsilon_R^2}\left(\frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2}-1\right)+\frac{2\varepsilon_R^4}{\varepsilon_u^6}\left(\frac{\beta R}{E_o\varepsilon_u}-1\right)\right]$
$\alpha_5 \cdot E_0^{-1}$	$\frac{\varepsilon_u^4}{2(\varepsilon_u^2-\varepsilon_R^2)^2}\left[\frac{1}{\varepsilon_R^4}\left(7\frac{\varepsilon_R^4}{\varepsilon_u^4}-3\right)\left(\frac{R}{E_o\varepsilon_R}-1\right)-\frac{1}{\varepsilon_R^4}\left(1-\frac{\varepsilon_R^4}{\varepsilon_u^4}\right)-\frac{4\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^6}\left(\frac{\beta R}{E_o\varepsilon_u}-1\right)\right]$
$\alpha_7 \cdot E_0^{-1}$	$\frac{\varepsilon_u^4}{2(\varepsilon_u^2-\varepsilon_R^2)^2}\left[\frac{1}{\varepsilon_R^4\varepsilon_u^2}\left(\frac{R}{E_o\varepsilon_R}-1\right)\left(3-5\frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2}\right)-\frac{1}{\varepsilon_R^4\varepsilon_u^2}\left(\frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_u^2}-1\right)+\frac{2}{\varepsilon_u^6}\left(\frac{\beta R}{E_o\varepsilon_u}-1\right)\right]$

Залежність (9) зручно представити у вигляді:

$$\tilde{\sigma} = \tilde{E}_0 \cdot \tilde{\varepsilon} \cdot \Psi(\tilde{\varepsilon}), \tag{12}$$

де $\tilde{\sigma} = \dfrac{\sigma}{R}; \ \tilde{\varepsilon} = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_u}; \ \tilde{\sigma}, \tilde{\varepsilon} \in (0,1)$,

$\tilde{E}_0 = \dfrac{E_0 \varepsilon_u}{R}$;

Таким чином, маючи в своєму розпорядженні вектором (10), є можливість представити діаграму стану для приватних видів деформування у вигляді (12). Перевагами (12) є простота і фізична прозорість.

Уявимо тепер нормовану ЩПЕД у вигляді: $\Psi(\tilde{\varepsilon}) = 1 + \alpha_3 \cdot \varepsilon_u^2 \tilde{\varepsilon}^2 + \alpha_5 \cdot \varepsilon_u^4 \tilde{\varepsilon}^4 + \alpha_7 \cdot \varepsilon_u^6 \tilde{\varepsilon}^6$.

$$e_n = a_1 + a_2 \chi_\varepsilon^2 + a_3 \chi_3^3, \qquad (13)$$

де $\chi_\varepsilon = \dfrac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}, \ \varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ - головні лінійні деформації;

χ_ε – параметр Лоде-Надаї деформованого стану;

$при \ \ \chi_\varepsilon = -1; \ e_u = e_{tn};$

$при \ \ \chi_\varepsilon = 1; \ e_u = e_{en};$

$при \ \ \chi_\varepsilon = 0; \ e_u = e_{shu}.$

Після визначення a_1; a_2; a_3 отримано:

$$e_n = 0{,}5\chi_\varepsilon [(\chi_\varepsilon + 1)e_{nc} + (\chi_\varepsilon - 1)e_{nt}] + (1 - \chi_\varepsilon^2)e_{nsh}, \qquad (14)$$

Вираз (14) є критерієм, що визначає експлуатаційний стан раціоналізованного елементу. В окремому випадку, коли верхні межі інтегрування в (6) ÷ (8) дорівнюють граничним деформаціям, вираз (4) зумовлює граничний стан в локальній області (точка, скінченний елемент). У свою чергу, внеінтегральние члени в (6) ÷ (7) можна представити у вигляді:

$$\frac{9}{2} K \cdot \varepsilon_0^2 = \frac{E_0}{6(1 - 2\nu)} \cdot I_1^2(T_\varepsilon), \qquad (15)$$

Тут слід зазначити, що без внесення значної похибки в рішення, об'ємна деформація εо в більшості випадків може прийматися рівною нулю. Інтегральні члени в (6) ÷ (8), завдяки поданням (9), обчислюються точно.

Важливим моментом є те, що пропонований підхід передбачає експлуатацію, в основному 3D – скінченно-елементних моделей.

Маючи в своєму розпорядженні алгоритми, що встановлюють послідовне об'єднання суміжних отбракованних елементів, з'являється можливість встановлення послідовності переходу від руйнування в локальній області до глобального віртуального колапсу.

Еталонне рішення. Як зазначалося раніше, еталонне рішення будується на базі залежностей (1) ÷ (2) з використанням ітераційної процедури (4). Специфічною особливістю тут є той факт, що в якості параметрів управління вибираються фізико-механічні параметри скінченного елементу:

$$C_{i+1}^{L} = (e_L e_n^{-1})\, C_i^{L}, \qquad (16)$$

где i – номер итерации;

C_i^L - фізико-механічний параметр, в загальному випадку анізотропного L-го кінцевого елемента на і-му кроці ітерації.

У разі ізотропного тіла залежність (16) набуває вигляду:

$$E_{i+1}^{L} = (e_L e_n^{-1})\, E_i^{L}, \qquad (17)$$

де E_i^L – модуль деформацій 1-го роду (внутрішній параметр).

При цьому, коефіцієнт поперечної деформації може (при необхідності) прийматися як незмінний, в силу його незначної мінливості $\nu \in (0;0{,}5)$. В остаточному вигляді еталонне рішення являє собою поле модулів деформацій, відповідно енергетично равнопрочному елементу.

Зовнішня процедура відображає задоволення критерію (1), реалізуючи перебір зовнішніх параметрів.

Використовуючи далі наслідок локального закону збереження потенційної енергії деформацій, запишемо:

$$V_N^L = [\, E_N^L (E_0^L)^{-1} \,]\, V_0^L \,, \qquad (18)$$

де V_0^L – стартовий обсяг L-го скінченного елемента (СЕ);

V_i^L – обсяг енергетично равнопрочного L-го СЕ;

E_0^L – початковий модуль деформацій 1-го ряду матеріалу;

E_N^L – модуль деформацій 1-го роду матеріалу на останньому кроці ітерацій;

N – кількість ітерацій.

Беручи гіпотезу про рівномірний розподіл енергії за ступенями свободи, слід перерахувати координати сітки СЕ на основі (18).

Дана логіко-обчислювальна процедура дозволяє отримати геометричний образ енергетично равнопрочной конструкції (рис. 1.9). Далі, як правило, проводиться перетворення (огрубіння) отриманої форми, з метою забезпечення технологічності виготовлення даного конструктиву.

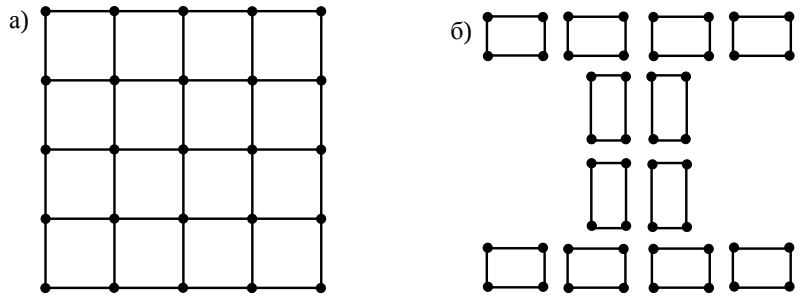


Рисунок 1.9. Трансформація сітки скінченних елементів: а) стартова; б) результуюча.

Припустимо вказати деякі корисні для обчислень нюанси, що призводять до трансформації стартовою сітки скінченних елементів (рис. 1.10).

Якщо позначити початкові розміри СЕ уздовж відповідних осей декартової системи XYZ через λx; λy; λz (для інших систем координат

міркування залишаються в силі), то після виконання процедури (18) вони стануть рівними:

$$\lambda_x^{'} = \lambda_x(1+\varepsilon_x);$$
$$\lambda_y^{'} = \lambda_y(1+\varepsilon_y);$$
$$\lambda_z^{'} = \lambda_z(1+\varepsilon_z). \qquad (19)$$

де ε_x; ε_y; ε_z – компоненти тензора деформацій.

Відносна зміна об'єму СЕ, при цьому, складе

$$\Delta\overline{V} = I_1(T_\varepsilon), \qquad (20)$$

де $\Delta\overline{V}$ - відносна зміна обсягу СЕ. У разі відмови прийняття концепції про рівномірний розподіл енергії за ступенями свободи, розглядається можливість заміни виразів (19) на наступні:

$$\lambda_x^{'} = \varphi_1\lambda_x(1+\varepsilon_x);$$
$$\lambda_y^{'} = \varphi_2\lambda_y(1+\varepsilon_y);$$
$$\lambda_z^{'} = \varphi_3\lambda_z(1+\varepsilon_z). \qquad (21)$$

де $\varphi_m = [e_L \cdot e_n^{-1}]^{\psi_m}$, $m = 1, 2, 3$, $\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 = 1$; $\psi_m \in (0;1)$;

$$\psi_m = \frac{|\sigma_m|}{\sum_{m=1}^{3}|\sigma_m|},$$

σ_m – головні напруження.

З (21), зміна геометрії СЕ буде відбуватися пропорційно величинам основних напруг, що логічно обгрунтовано.

Як зазначено вище, виконання критерію (1) передбачає можливість використання всього, допустимого для конкретних умов, спектру конструктивних рішень (зміни способів і місцеположень навантаження, зміни координат і характеру зв'язків, використання попереднього натягу, зміни жорсткості окремих елементів та ін.). Тоді, подібний підхід є альтернативою

концепції А. Пуанкаре те, що «за допомогою інтуїції винаходять, а за допомогою логіки доводять»».

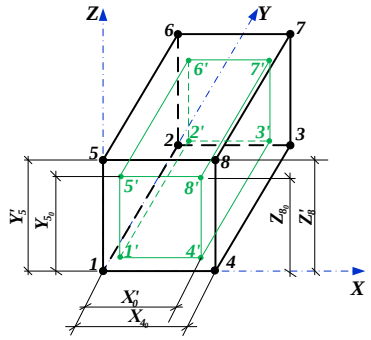


Рисунок 1.10. Віртуальне зміна координат вузлів кінцевої елемента в локальній системі координат (початкові координати позначаються нулем, отримані в результаті розрахунку - штрихом, цифрами позначені вузли СЕ).

Рішення завдань з введенням критерію, в певній мірі, а також можливість регулювання не тільки геометричними, але фізико-механічними характеристиками конструктивно-анізотропних залізобетонних оболонок є дуже актуальним питанням сьогодення.

У зв’язку з чим, а також з метою поповнення цієї інформації, на базі проведеного аналізу зроблені висновки і сформульовані завдання справжнього дослідження.

.

1.4. Експериментальне моделювання

На сьогодні нажаль існує достатньо обмежена інформація щодо результатів експериментальних досліджень анізотропних залізобетонних оболонок. В роботі [41] розглянуто установку для створення короткочасних і довготривалих навантажень, яка базується на плинності рідин (рис.1.11). Як рідину доцільно використовувати воду.

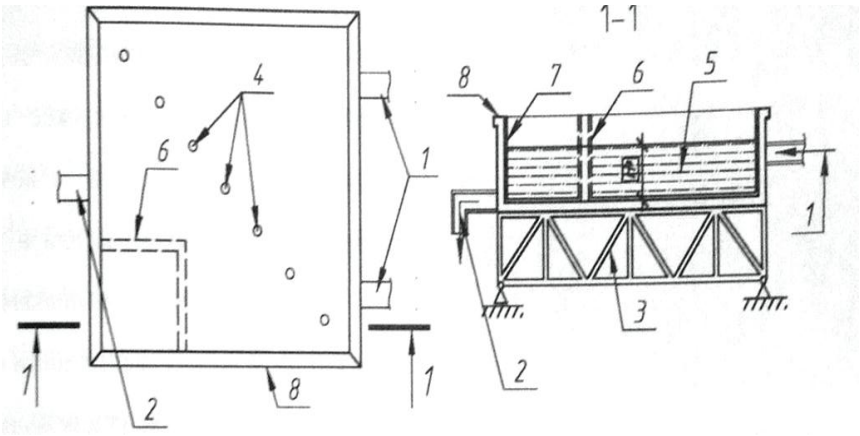


Рисунок 1.11 – Схема натурних випробувань конструкцій водою

1 – підвідні патрубки; 2 – відвідні патрубки; 3 – випробовувана конструкція; 4 – точки замірів глибини; 5 – вода; 6 – перегородки; 7 – гідрофобна плівка; 8 – ванна.

Сутність методу полягає в облаштуванні над конструкцією ванни, що заповнюється водою. Таким шляхом можна здійснювати цикли навантаження - розвантаження, імітувати довготривалі навантаження, активні навантаження, фрагментарні та несиметричні навантаження (облаштовуючи у ванні перегородки).

Сама ванна виготовляється з легких матеріалів. Всередині ванни облаштовується гідрофобна плівка, яка, на жаль, не виключає випаровування води, оскільки розміщується лише знизу та на боковій поверхні). Для накачування та зливання води до ванни підводяться патрубки.

Величина навантаження на конструкцію визначається шляхом замірювання водяного стовпа. Важливо також на кожному етапі заміряти товщину води в низці точок грузової поверхні та перераховувати величину умовного рівномірного навантаження (наслідок «слідкувального навантаження»). Унизу конструкції зазвичай встановлюють індуктивні датчики, що вимірюють вертикальні переміщення. До датчиків можна підімкнути ЕВМ, обладнану спеціальним програмним забезпеченням. Це значно пришвидшує та полегшує збір і обробку даних. У роботі [41] акцентовано перевагу натурних

методів випробовувань щодо теоретичного моделювання та лабораторним випробовуванням, оскільки вони умовні або не точні. Обробка даних уможливлює точнішу оцінку того, як працює навантажувана конструкція, і, як наслідок, маємо змогу покращити методи розрахунку випробовуваних елементів. Також представлені фотографії самої конструкції, та варіанти розміщення перегородок (рис.1.12):

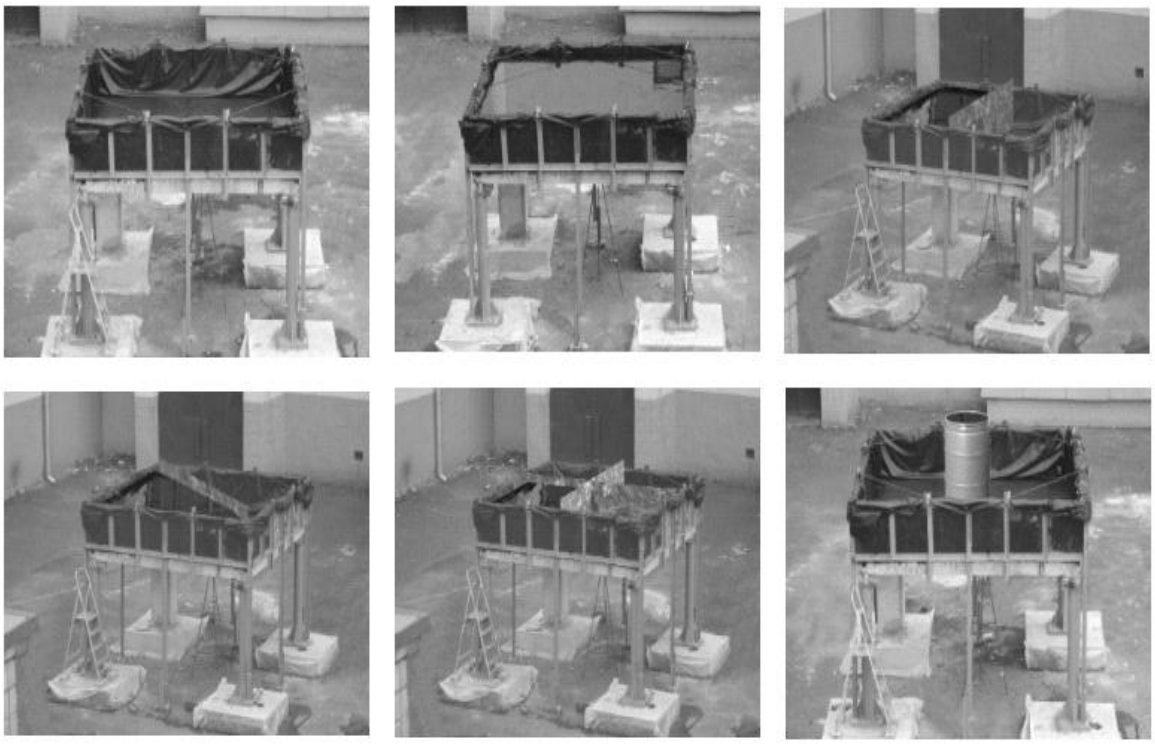


Рисунок 1.12. Варіанти розміщення перегородок

Перевагою такого завантаження є те, що його можна проводити без зупинки виробничого процесу, оскільки випробування не передбачає порушення конструкції.

Важливою є можливість поступово завантажувати конструкцію, що дає змогу відслідкувати поступовий перехід із одного стану в інший (поява пластичних деформацій, тріщин, біфуркацій тощо).

Потрібно зауважити, що плинність води надає даному виду випробовувань певні особливості, які називають слідкувальним навантаженням. Його сутність полягає в тому, що в разі появи деформацій рівень води і, як наслідок, навантаження змінюються. Це істотно впливає на викривлення поля деформацій, тому необхідно проводити постійний контроль і коректування.

1.5 Технологічні принципи виготовлення полегшених залізобетонних оболонок

Ідея використання вкладок не нова, оскільки такі дії виконувалися вже майже століття тому. Але раніше, встановлюючи вкладки мали на меті отримати пустоти всередині монолітної конструкції. Це означало, що після набуття бетоном необхідної міцності вкладиші демонтували, а це ускладнювало технологічний процес. Як підтвердження розглянемо патент Д. Д. Капленка «Спосіб виготовлення ребристих, переважно облицювальних, плит, наприклад, з бетону» [42], опублікований ще в 1944 році. В роботі досліджено метод виготовлення ребристих плит. Після встановлення вкладок у проектне положення форма заповнюється бетонною сумішшю до їхнього рівня. Згодом їх виймають і заповнюють утворені пустоти піском, який відсмоктує воду із суміші, що прискорює процес зчеплення бетону.

ДБН В 2.6-98:2009 [43] визначає правила конструювання залізобетонних конструкцій (за винятком конструкцій спеціального призначення — вогнестійких конструкцій, конструкцій з фібробетону тощо). У цьому документі наведено базові правила, методи розрахування та проектування бетонних і залізобетонних конструкцій промислових, громадських будівель та споруд.

Переваги монолітних залізобетонних конструкцій із застосуванням вкладок-пустотоутворювачів описано в [44].

Вкладки виготовляють із різноманітних матеріалів (здебільшого це полімери) вони різняться за формою (сферичні, циліндричні, неправильної форми). Під час формування конструкцій із простими геометричними формами вкладки встановлюються у проектне положення за допомогою арматурних каркасів. Монтаж виконується за технологіями Airdeck (рис.1.13), BubbleDeck (рис.1.14), Cobiax, U-Boot Beton (рис.1.15) та U-Bahn Beton (рис.1.16).

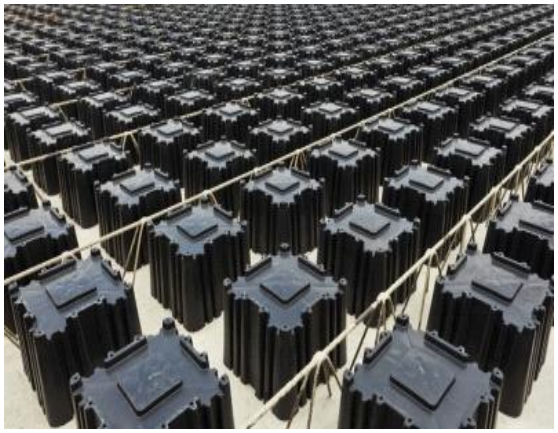


Рисунок 1.13. Airdeck

Рисунок 1.14. BubbleDeck

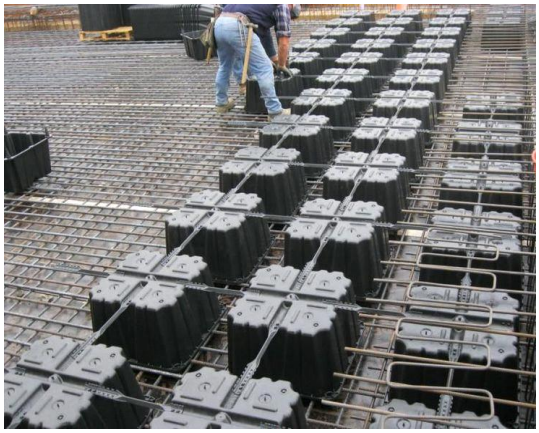


Рисунок 1.15. U-Boot Beton

Рисунок 1.16. U-Bahn Beton

За технологією Airdeck [45] на заводі виготовляють нижню обшивку плити перекриття у вигляді збірної залізобетонної конструкції із втопленними вкладками з поліпропілену Робочі розміри вкладишів-коробок 20 × 20 см, а висота варіюється від 12 до 35 см. Крок вкладишів-коробок постійний і дорівнює 30 см.

Технологія BubbleDeck [46] підрозділяється на три типи: тип А — аналог технології Airdeck, різниться тільки армуванням і формою вкладки; тип В — плоскі арматурні модулі із розміром плити складаються із вкладок і арматурного каркаса, вони встановлюються в опалубку на будівельному майданчику, і здійснюють бетонування по двухстадийной технології; тип С — готові збірні залізобетонні плити перекриттів заводського виготовлення із вкладками для доставки на будівельний майданчик. Як вкладиші застосовують порожнисті кулі сферичної або еліптичної форми з переробленого пластику (поліетилен, полівінілпропілен або полівінілхлорид) діаметром від 18 до 36 см, залежно від товщини бетонованої плити перекриття. Вкладки розміщують всередині арматурного модуля й утримують в проектному положенні за допомогою спеціальної форми осередків нижньої і верхньої сітки.

Daliform Group [47, 48] пропонує технологію аналогічну до Cobiax, але різниться істотними відмінностями. Вона має дві системи: U-Boot Beton і U-Bahn Beton.

У системі U-Boot Beton застосовують вкладки блокової форми з повторно переробленого поліпропілену, із робочими розмірами 52 × 52 см і заввишки від 10 до 56 см. Використання вкладок системи U-Boot Beton дозволяє бетонування плит перекриття від 20 до 76 см завтовшки. Відстані між вкладками виставляються за допомогою розпірних муфт із градуйованою шкалою. У системі U-Bahn Beton застосовують вкладки П-подібної форми з робочими розмірами 120 × 40 см і заввишки 20 см із повторно переробленого поліпропілену, до того ж торчаки вкладок можуть закриватися типовими

заглушками. Ця система розроблена спеціально для реалізації односпрямованих плит перекриття з монолітного залізобетону.

Паралельно в сучасному будівництві широко використовуються технології отримання полегшених конструкцій із застосуванням в якості вкладок-пустотоутворювачів елементів, виготовлених із пінополістиролу. Яскравим прикладом застосування таких технологій є будівництво найвищої житлової споруди в Мексиці — хмарочоса «Santa Fe II» заввишки 167 м, побудованого в 2013 р [49]. Залізобетонні плити перекриття мають товщину 250 мм, а їхня середня вага — всього лише 3,5 кН / м^2. Пінополістирольні вкладиші розмір яких становить 80 × 80 см розташовані в плиті з кроком 100 см у двох напрямах, вони забезпечують бетонування внутрішніх ребер завтовшки 20 см.

Як зазначалося раніше, дисками перекриття можуть слугувати оболонки з різною кривизною. Але вони мають один недолік, а саме: створення криволінійних опалубок — дуже дорогий, складний і довготривалий процес, який потребує багато часу і наявності висококваліфікованих робітників. Отже доцільно розглянути безопалубні способи зведення елементів конструкцій. Найвідомішим на сьогодні є метод торкретування. Він був запатентований ще у 1911 році Карлом Еклі.

У роботі [50] описані методи замішування та нанесення цементної суміші, а також апарат для торкретування. Торкрет установка зазвичай складається з бетон-шприц машини та компресору. Суха цементна суміш подається до сопла через шланг, змочується водою та викидається з великою швидкістю на торкретуємо поверхню. Також у 1974 р. Цейтлін та Маркзон запропонували пристрій для формування залізобетонних оболонок [51]. Даний пристрій дозволяє формувати панелі-оболонки з змінною висотою та постоянною шириною профіля. Це досягається за рахунок того, що на рамі самохідного візка змонтований бункер, а задня стінка бункера сформована з 2х

шарнірно-з`єднаних частин. Також там розміщені кілька важелів, на кінцях яких є катки, що переміщуються по криволінійним напрямам. Саме ці катки регулюють товщину оболонки.

Актуальним є використання стендового способу формування залізобетонних виробів. Він характеризується тим, що усі процеси (армування, формування, твердіння) відбуваються у нерухомих формах, що збираються на гладких стендах. До набуття необхідної міцності бетоном вироби залишаються нерухомими, поки обладнання переміщується. На сьогодні найбільш розповсюджені такі методи стендового формування, які описані у роботі [52]: - екструзія (армування виключно стальними канатами, бетонна суміш видавлюється шнеками, формуючи виріб. Характерна висока ступінь ущільнення бетонної суміші. Потребує ретельного підбору фракцій піску та щебеню, використання високоякісного цементу.

Вибір виду технології зумовлений двома факторами: наявність виробників технологічного обладнання; якісними показниками наявних інертних матеріалів [53]. При торкретуванні раціонально використовувати фібробетон [54, 55]. Таке рішення раціональне за рахунок того, що фібри (волокна) беруть на себе роль армування, що полегшує монтаж конструкції.

Оскільки у нашому випадку ми розглядаємо оболонки покриття, то важливо відмітити, що зменшення ваги вищерозміщених елементів позитивно впливають на конструкцію в цілому (зменшується навантаження на опорні елементи та фундаменти). Метою даного підрозділу роботи є порівняння різних конструкцій полегшених залізобетонних перекриттів із вкладишами-пустотоутворювачами, що не виймаються, а також визначення можливості застосування сучасних технологій виготовлення полегшених залізобетонних перекриттів для будівельної галузі в Україні. Техніко-економічні показники конструкцій полегшених перекриттів (конструктивна товщина перекриття 25 см) наведені у таблиці 1.2.

Таблиця1. 2.

Техніко-економічні показники конструкцій полегшених перекриттів (конструктивна товщина перекриття 25 см)

Назва технології	Характеристики вкладишів				Наведена товщина перекриття, см
	обсяг 1 вкладиша, $см^3$	крок вкладишів, см	кількість вкладишів, шт/$м^2$	обсяг вкладишів, $м^3/м^2$	
Airdeck	4100	30	11	0,045	20,4
BubbleDeck	3100	20	25	0,076	17,2
Cobiax	9100	35	8,2	0,075	17,5
U-Boot Beton	28000	64	2,44	0,068	18,2
Пінополі-стирол	121500	100	1	0,1215	12,85

Всі наведені технології, що використовують типові рішення вкладишів із вторинної пластмаси, мають істотні недоліки, що не дозволяє широко їх використовувати в будівельній галузі України:

1.6. Висновки до розділу 1.

1. Проведений літературний аналіз принципів конструювання просторових елементів зі складною геометрією, розглянуті моделі деформування двопоясних оболонок, та метод гідравлічного випробування.
2. На сьогодні нажаль відсутні роботи нелінійного чисельного дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямах, що зумовлює актуальність данного дослідження.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АНІЗОТРОПНИХ ОБОЛОНОК, ПРОПОНОВАНОГО ВИДУ

2.1 Формування топології оболонок

Сучасний стан теорії розрахунку залізобетонних конструкцій, дає змогу створювати криволінійні конструктивні форми, проектувати і зводити будівлі та споруди, унікальні за своєю архітектурою, з довільним плануванням приміщень, великими прогонами і т.д. Однак, як правило, сміливі і нестандартні рішення архітекторів, унікальність яких нерідко забезпечується за рахунок створення несучих конструктивних елементів складної конфігурації, призводять до значного подорожчання проекту, викликаного в першу чергу чималою перевитратою матеріалу, а також необхідністю розроблення унікальних технологічних операцій і виготовленням «разової» опалубки .

У зв'язку зі сказаним, розглянуті конструктивно-анізотропні залізобетонні оболонки з урахуванням концепції «конструкція – матеріал – технологія» яка спрямована на вирішення вищезазначеної проблеми [56]. Відмінною особливістю конструктивно-анізотропних залізобетонних оболонок є використання всередині монолітного залізобетонного елемента вкладишів - пустотоутворювачів (рис.2.1.) Вкладиші можуть бути виконані з будь-якого доступного, легкого матеріалу (наприклад, пінополістиролу, пінопласту, пінополіуретану та ін.). Поміщені всередині залізобетонної оболонки вкладиші перетворюють переріз згинального елемента з прямокутного у двотавровий, одна полиця якого сприймає напруги розтягнення, інша – стиснення. На стадії

проектування визначається необхідна товщина залізобетонних полиць перерізу, виходячи з чого призначаються розміри вкладиша.

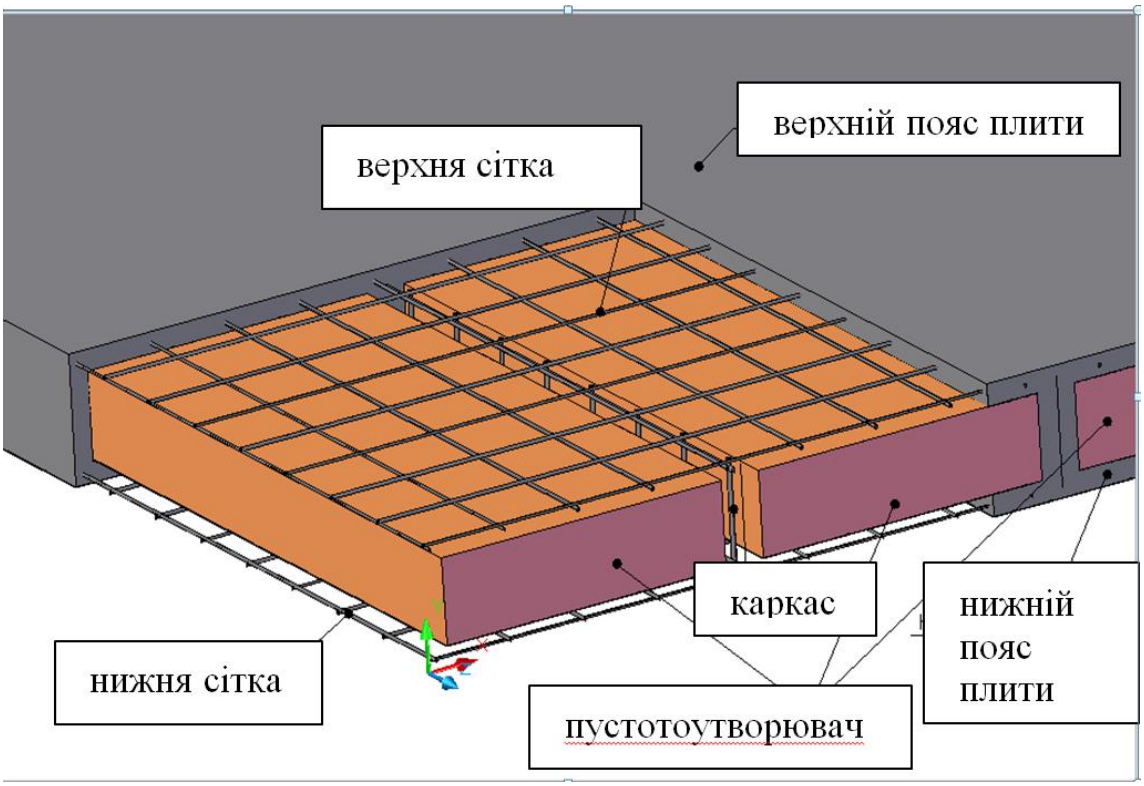


Рисунок 2.1. Структура оболонки (фрагмент).

2.2. Структура пропонованих конструкцій

Структура цих конструкцій, як правило, характеризується простою зовнішньої і складною внутрішньою геометрією. Основною ідеєю тут є сховання, в процесі бетонування, вкладишів обумовленої форми і розмірів, виконаних з легких, часто використовуваних матеріалів у будівництві таких, наприклад, як пінополістирол, мінвата і т.д. Формована, в цьому випадку, монококова топологія конструктиву схожа біонічним системам [57].

Ефективність такої конструкції обґрунтовується також симетрією перетинів, яка зумовлює можливість її довільного обпирання, що породжує знакоперемінність поля згинальних моментів.

Сказане є наслідком відмінності опорів бетону розтягування і стиснення, з одного боку, і максимальною ефективністю (в сенсі витрат матеріалів) односторонньо оребрених систем з іншого. Таким чином, конструкція розглянутих оболонок складається з двох (верхньої і нижньої) обшивок, внутрішніх ребер і вкладишів-пустотоутворювачів .

Конструктивне рішення армування моделей оболонок являє собою систему криволінійних каркасів, що описують форму оболонки, а також гнутих стрижнів, розташованих у ребрах.

2.3 Принципи армування

Зовнішня і внутрішня бетонні обшивки виконувалися товщиною 50 мм, а між ними розташовувався вкладиш-пустотоутворювач з екструдованого пінополістеролу товщиною 150 мм. Обшивки армувалися однаковою сіткою 200х200 мм, d = 6 мм. По двох діагональним напрямкам оболонки розташовувалися забезпечують спільну роботу обшивок ребра шириною 100 мм, які армовані плоским каркасом з d = 10 мм.

Виготовлення плоских криволінійних арматурних каркасів і вкладишів з пінополістеролу здійснювалося в заводських умовах. Топологія і точність геометричних розмірів вкладишів забезпечувалася за рахунок застосування спеціальних кондукторів. У свою чергу, необхідна форма вкладишів дотримувалися за рахунок використання, при розкрої листів пінополістиролу спеціальних шаблонів. В результаті об'єднання арматури конструкції і вкладишів формувався кістяк, який утворює екранну поверхню зумовлюючу відсутність при бетонуванні будь-якої опалубки [58].

Армування являє собою систему криволінійних каркасів, що описують форму оболонки, а також гнутих стрижнів, розташованих в ребрах.

Максимальний радіус вигину арматури обговорений відповідними нормативними документами. Дана обставина в певних випадках виступає як обмеження для максимального радіуса кривизни оболонки в цілому.

Конструкція монолітної оболонки містить арматурні каркаси, між якими розташовані бетонні ребра та вкладиші, що забезпечують вирівнювання зусиль і спільну роботу зовнішньої і внутрішньої обшивок (рис.2.2., 2.3., 2.4.).

Рисунок 2.2. Арматурні каркаси с вкладишем-пустотоутворювачем з екструдованого пінополістиролу для залізобетонних оболонок

Рисунок 2.3. Установка арматурного каркасу в циліндричній оболонці з закріпленним вкладишем-пустотоутворювачем

Рисунок 2.4. Установка арматурного каркасу в сферичній оболонці з закріпленим вкладишем-пустотоутворювачем

Спосіб бетонування оболонок – «мокре» торкретування. Макетні або експериментальні зразки, що розроблені в єдиній зв'язці «конструкція – матеріал - технологія» створюють основу для формування конструкцій з наперед заданими позитивними властивостями та дозволяють створювати будь-які криволінійні форми, проектувати і будувати будівлі, унікальні за своєю архітектурою, з вільним плануванням приміщень, великими прольотами і необхідної висоти. Необхідна довговічність монолітних залізобетонних конструкцій повинна бути забезпечена на стадіях їх проектування і зведення шляхом вибору всіх атрибутів конструкції. Модель сферичної оболонки та модель циліндричної оболонки зображені на рис.2.5, 2.6.

Рисунок 2.5. Модель сферичної оболонки

Рисунок 2.6. Модель циліндричної оболонки

2.4. Математичне моделювання, його особливості, результати та їх аналіз

Моделювання різних схем навантажень на конструктивно-анізотропні конструкції різної гауссової кривизни є досить актуальним завданням.

Для простих примітивів поверхнева сітка будується за допомогою аналітичного завдання області. Далі поверхневі сітки двох примітивів

перетинаються, і на їх основі будується нова поверхнева сітка для об'єднання, перетину або різниці двох примітивів.

Загальна ідея перетину поверхневих сіток полягає в наступному. Спочатку будується ламана лінія перетину поверхневих сіток, що розбиває трикутники в сітках на кілька зв'язкових частин. Далі смужку трикутників вздовж лінії перетину перебудовують заново для з'єднання потрібних частин поверхні. На рис. 2.7 показана побудова сітки скінченних елементів для розглянутих об'єктів.

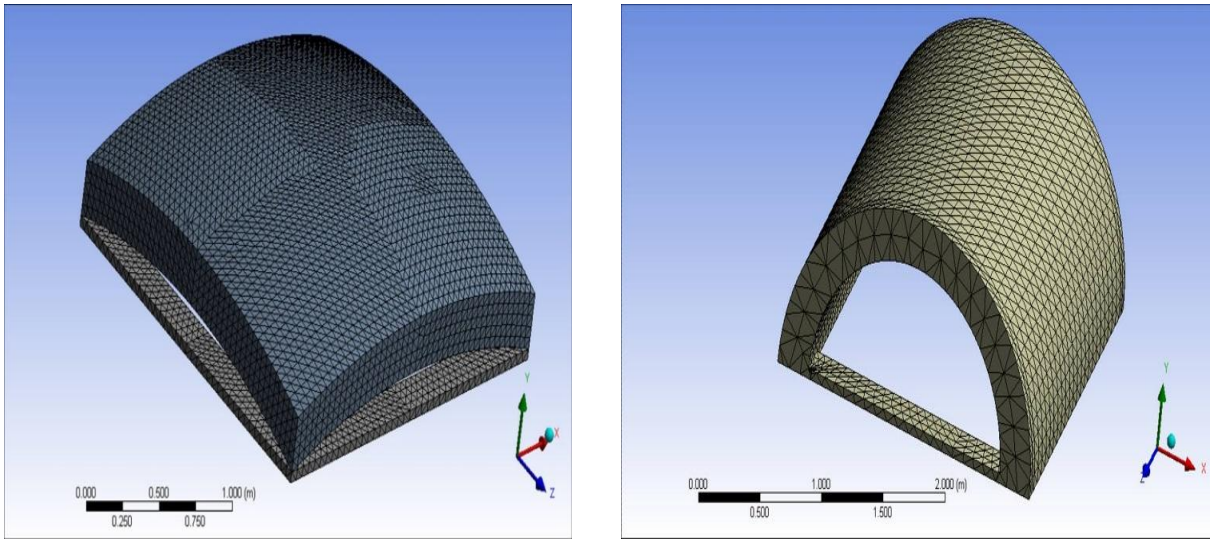


Рисунок 2.7 - Побудова сітки скінченних елементів для оболонок різної кривизни.

Після того, як поверхнева сітка побудована, можна приступати до побудови тетраедальної сітки всередині області. Пропонується комбінація двох методів.

Перший метод - класичний алгоритм, що стосується фронту. Він спрацьовує не завжди і може залишити після роботи частину ще не розбитою на тетраедри області. Для розбиття цих проблемних ділянок застосовується другий метод, заснований на тріангуляції Делоне [59].

Алгоритм використовується для побудови тетраедральной сітки всередині заданої обмеженою області.

Область задається поверхневої орієнтованою конфортною тріангуляцією, званої фронтом. Після цього крок за кроком будуються тетраєдри на кордоні

фронту з просуванням його всередину області. У кожен момент часу поточний фронт відокремлює частину з побудованої тетраедральною сіткою від ще не розглянутої частини. Якщо в кінці фронт виявиться порожнім, то тетраедральная сітка буде побудована для всієї області. Якщо у фронті залишаються трикутники, але жоден новий тетраедр побудувати не вдається, то алгоритм зупиняється, і застосовується другий метод.

На кожному кроці з фронту вибирається трикутник з найбільшою площею, і на ньому як на підставі будується тетраедр з урахуванням бажаного розміру елементів сітки. Після цього тетраедр перевіряється на перетин з фронтом. У разі перетинів підбирається інший тетраедр. Новий тетраедр додається в сітку, а фронт просувається всередину області. Метод дозволяє будувати сітки в складних геометричних областях, в тому числі анізотропних які мають розрізи (рис. 2.8). Також метод дозволяє контролювати бажаний розмір елементів сітки і може вибирати його автоматично (рис.2.9.). Дана обставина важливо не тільки в геометричному аспекті, але для забезпечення всередині елемента однорідного напружено-деформованого стану (НДС).

Таким чином побудовано тривимірну скінченно-елементну модель, що дозволяє оцінювати напружено-деформований стан конструкцій різної кривизни розглянутого типу.

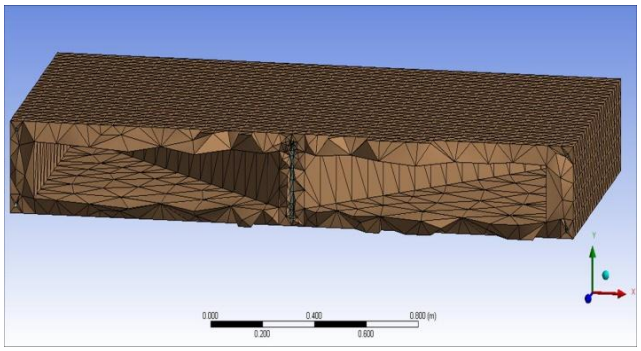


Рисунок 2.8 Розріз тетраедральної сітки на анізотропній пластині площиною YOX

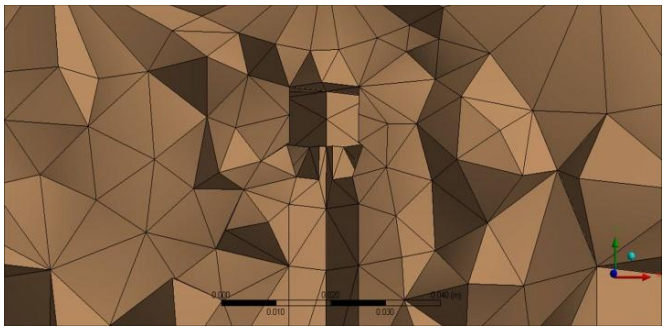
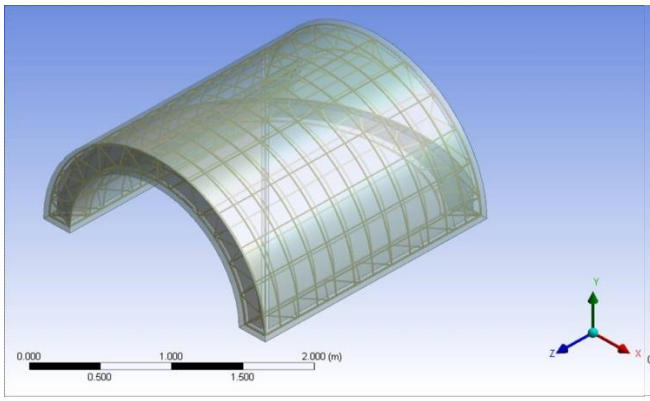
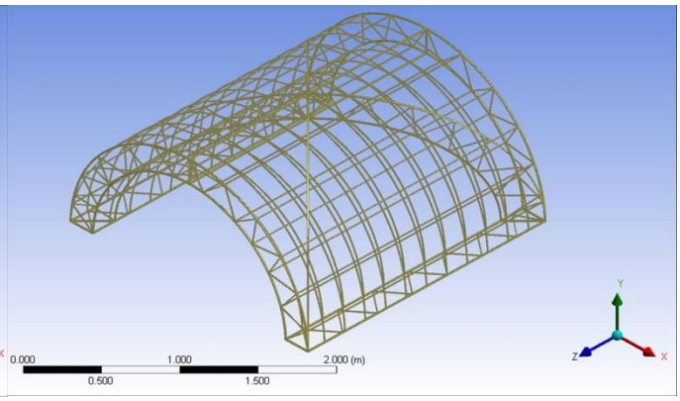


Рисунок 2.9 Автоматичний вибір кроку сітки

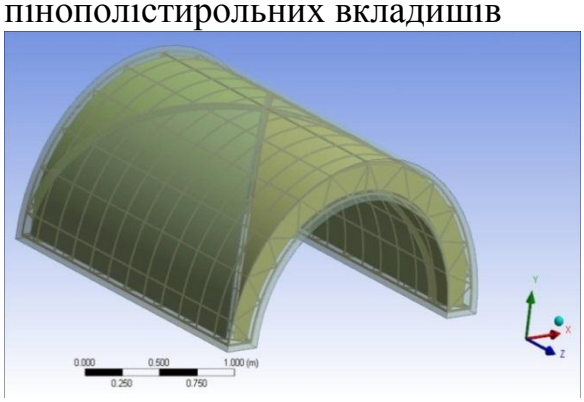
В рамках дослідження [60, 61 , 62], чисельна реалізація здійснена на базі розроблених оболонок і виконана в середовищі ПК «Ansys» (додаток Д). У побудованій моделі арматура моделювалася окремими стрижнями з об'ємних СЕ, яким присвоювалися фізичні параметри сталі. Моделювання геометрії циліндричної і сферичної оболонок зображене на рис.2.10.



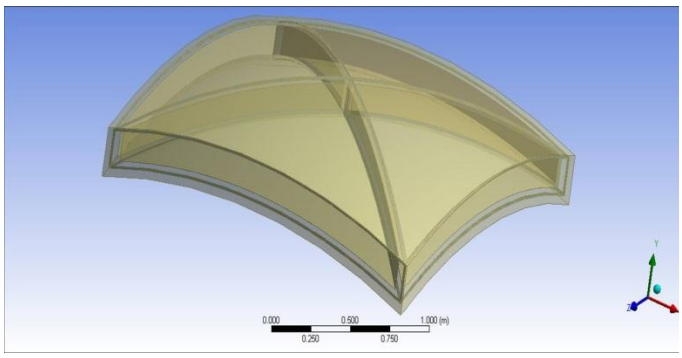
а)моделювання геометрії пінополістирольних вкладишів



б) моделювання арматурних стрижнів



в) фрагмент циліндричної оболонки

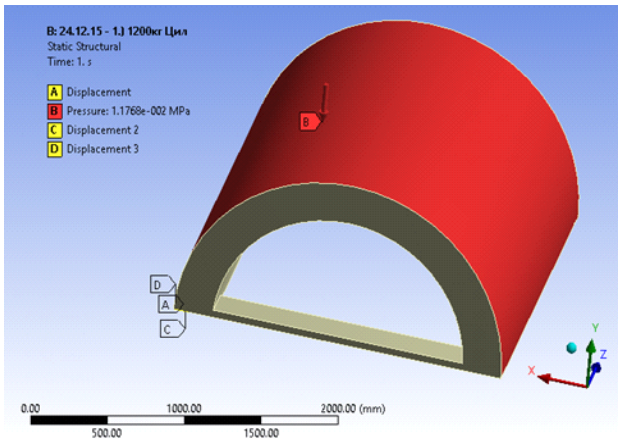


г) фрагмент сферичної оболонки

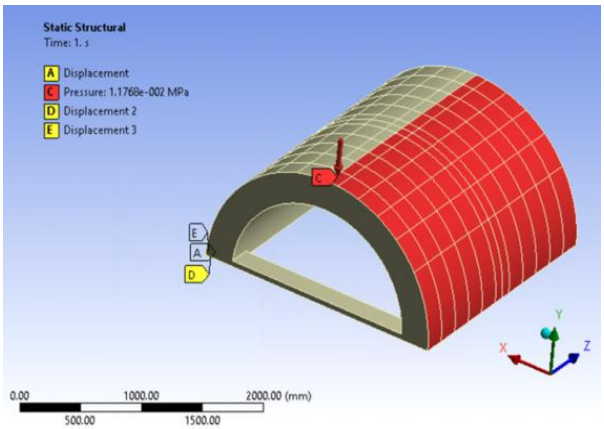
Рисунок 2.10 - Моделювання геометрії циліндричної і сферичної оболонок

Інструментарій розрахункового комплексу дозволяє проводити автоматичну тріангуляцію складних форм на скінченні об'ємні елементи шляхом автоматичного імпорту з допоміжного програмного комплексу тривимірного моделювання (в даному випадку використовувався ПК «Autodesk Inventor»). У побудованій моделі циліндричної оболонки налічується - 209319 вузлів і 100271 скінченних елементів. Обпирання

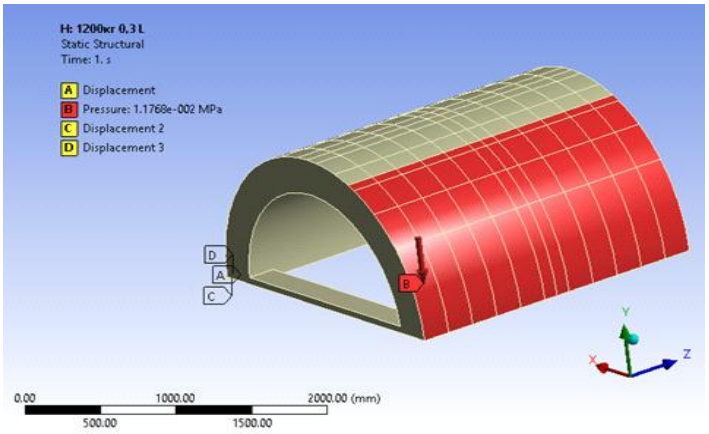
призначалося шарнірно нерухомим за чотирма кутовими точками оболонки в плані. Навантаження прикладалося до поверхні оболонки за трьома різними схемами, наведеними на рис. 2.11. З огляду на значну жорсткість конструкції величина прикладаємого рівномірно розподіленого навантаження становила 10 кН / м^2.



а)



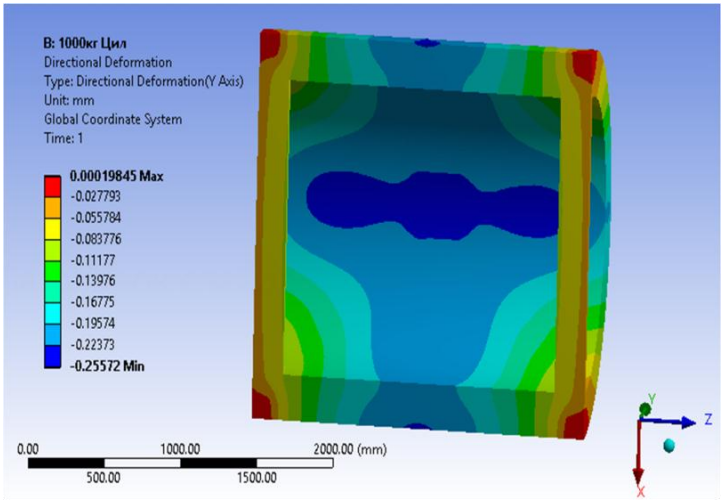
б)



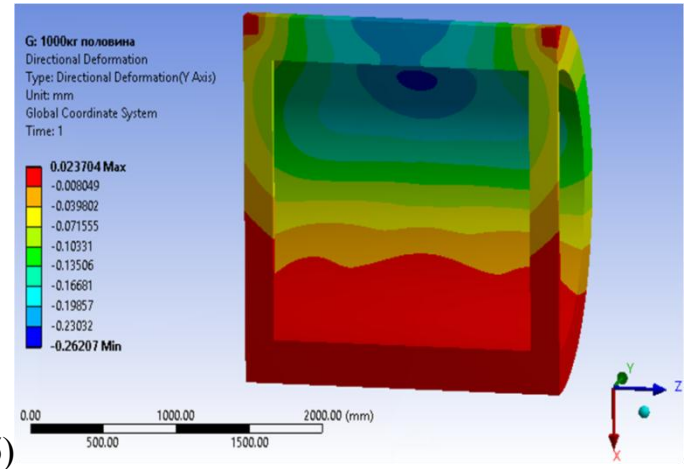
в)

Рисунок 2.11 Схеми навантаження: а - повна; б - 1/2 поверхні; в - 1/3 поверхні.

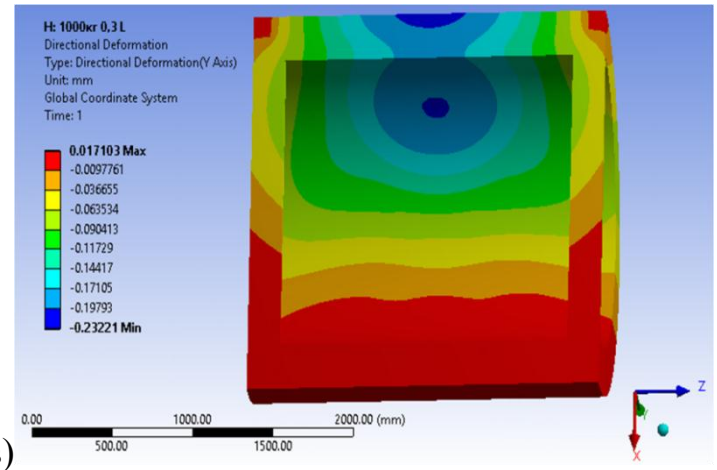
На рис. 2.12, 2.13 наведені отримані в результаті розрахунку поля переміщень нижньої поверхні оболонки для кожної з 3-х схем завантаження по вертикальній осі "Y" і горизонтальній осі «X» відповідно.



а)

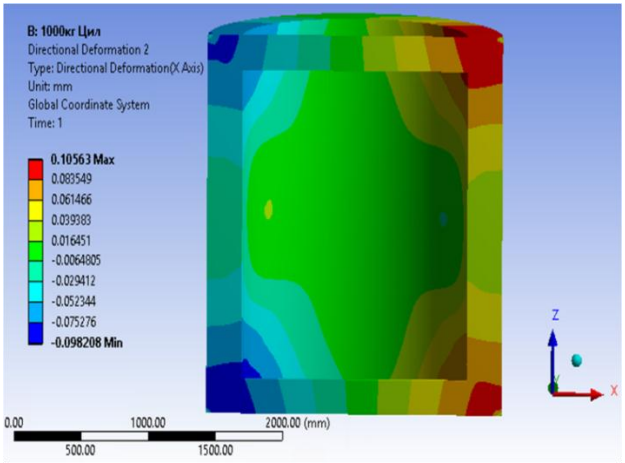


б)

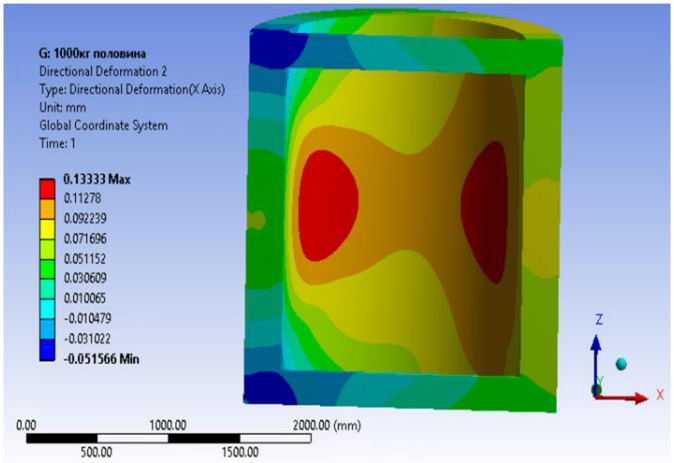


в)

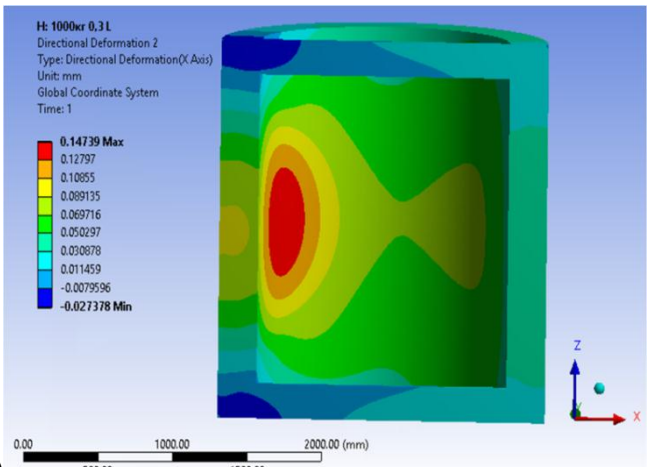
Рисунок 2.12. Ізополя вертикальних переміщень оболонки при різних завантаженні: а- вся поверхня; б-1/2 поверхні; в- 1/3 поверхні.



а)



б)



в)

Рисунок 2.13. Ізополя горизонтальних переміщень циліндричної оболонки при різних схемах завантаження: а- вся поверхня; б-1/2 поверхні; в- 1/3 поверхні.

У побудованій моделі сферичної оболонки скінченно-елементна модель налічувала 459061 елементів и 261791 вузлів.

Опирання призначалося шарнірно нерухомим за чотирма кутовими точками оболонки в плані. Навантаження прикладалося до поверхні оболонки за чотирма різними схемами, наведеними на рис.2.14.

Величина прикладаємого рівномірно розподіленого навантаження становила 10 кН / м2.

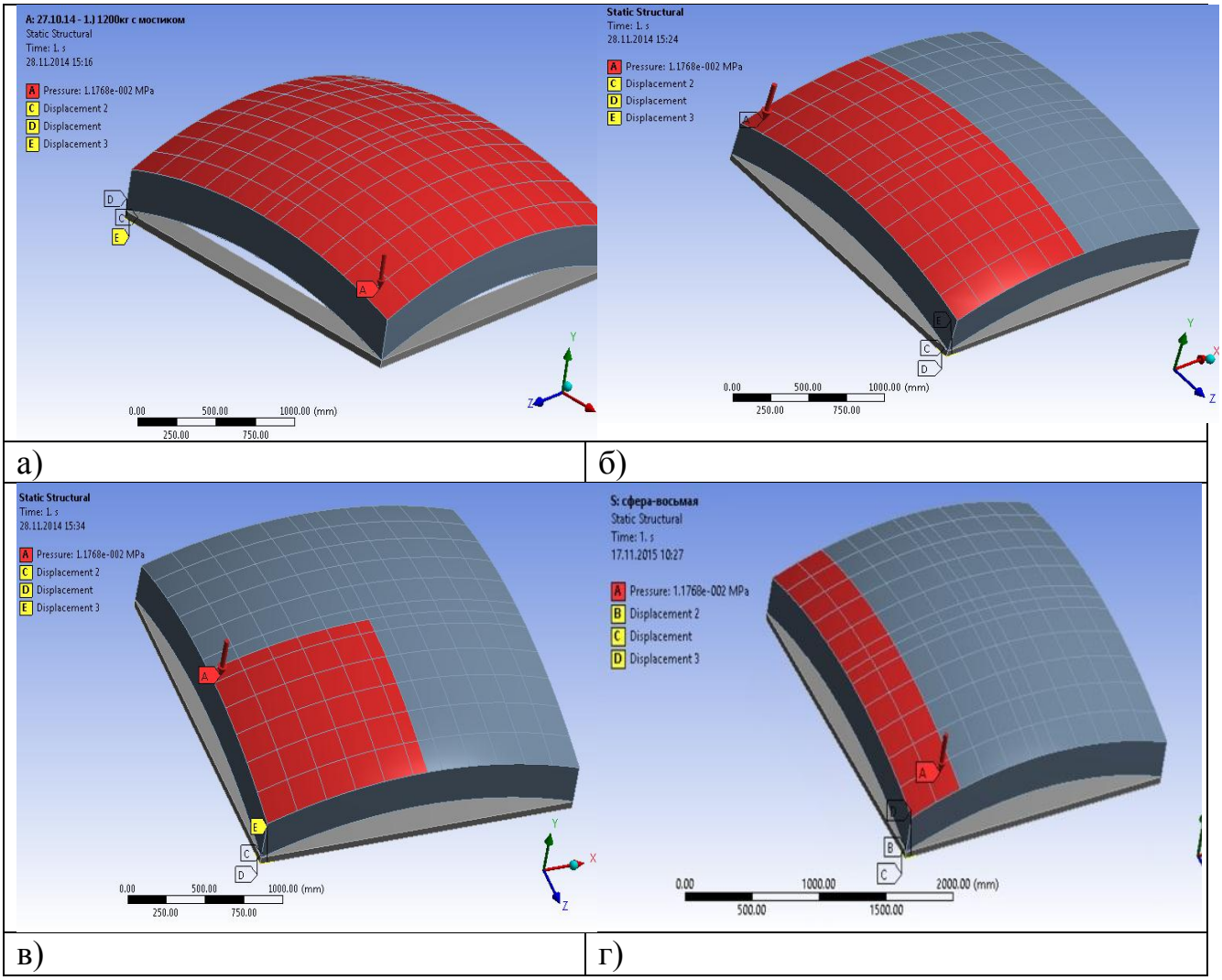
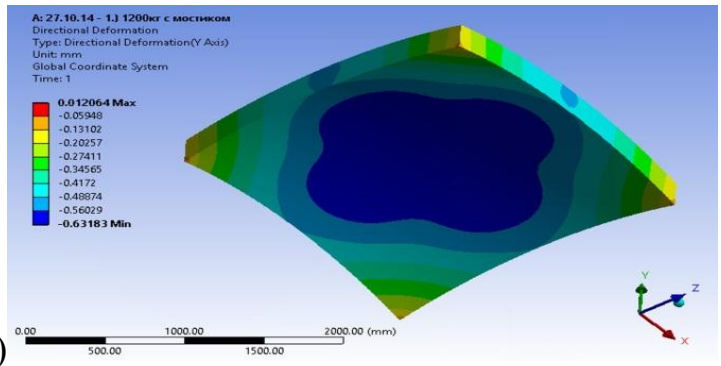
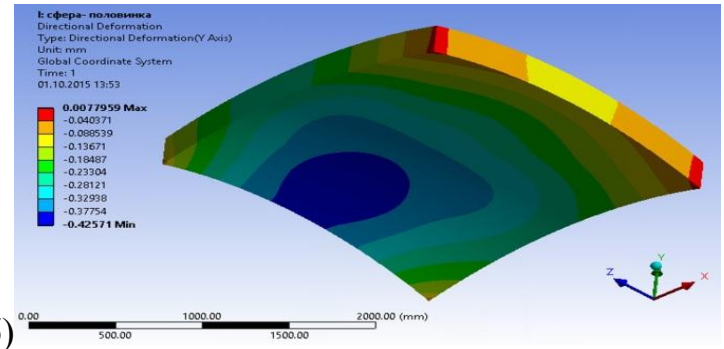


Рисунок 2.14. Схеми навантаження: а) повна; б) 1/2 поверхні;в) 1/4 поверхні; г) 1/8 поверхні.

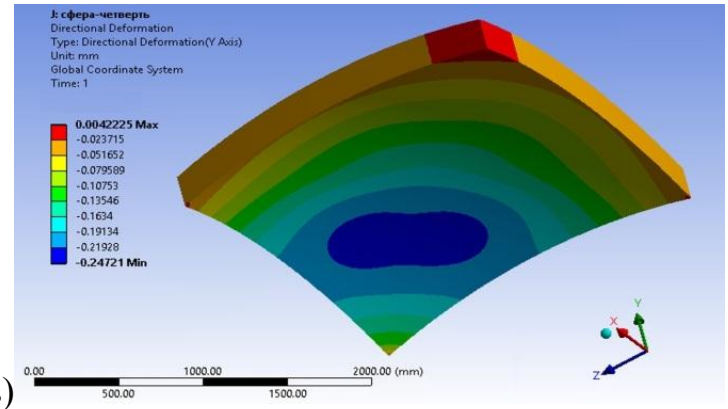
На рис. 2.15 наведені отримані в результаті розрахунку поля переміщень ний поверхні сферичної оболонки для кожної з 4-х схем навантаження.



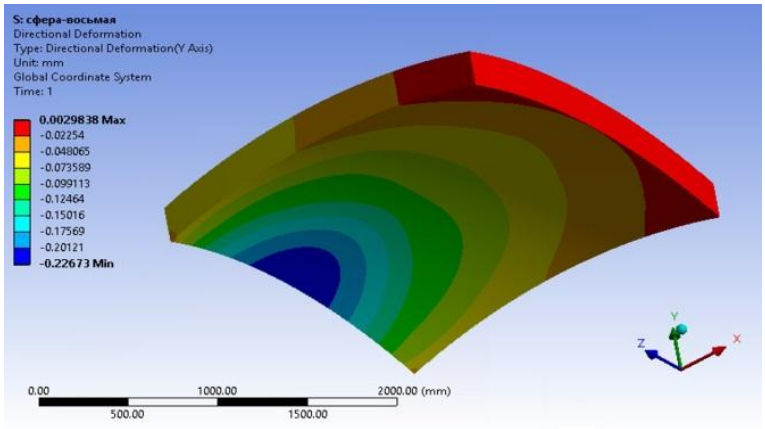
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.15. Ізополя вертикальних переміщень оболонки при різних схемах завантаження:а- вся поверхня; б-1/2 поверхні; в- 1/4 поверхні; г-1/8 поверхні

2.5. Висновки до розділу 2

1.Сформована топологія оболонок, яка дає змогу створювати криволінійні конструктивні форми залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок з урахуванням концепції «конструкція – матеріал – технологія».

2. В роботі виконано математичне моделювання, побудовано тривимірну скінченноелементну модель, яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан конструкцій різної гаусової кривизни розглянутого типу.

3. В рамках дослідження, чисельна реалізація здійснена в середовищі ПК «ANSYS», отримані переміщення від чисельного рівномірно-розподіленого навантаження 10 кН/м^2 до поверхні циліндричної оболонки і сферичної оболонки за різними схемами навантаження.

3. РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК, ЯКІ РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ

3.1. Принципи формування ефективних рішень оболонок

Дуалізм світу зумовлює прямий пошук конструктивних рішень механічних систем, що розвиваються в напрямках наукових праць В.С. Шмуклера [63].

- створення елементів (конструкцій) з максимальною несучою здатністю і/або жорсткістю при заданій витраті матеріалів;

- створення елементів (конструкцій) з мінімальною витратою матеріалів при заданому ресурсі.

В обох випадках проблема зводиться до постановок і рішень нелінійних задач раціоналізації (оптимізації). Як відомо, ступінь складності застосовуваних методів і алгоритмів реалізації, в цьому випадку, істотно вище, ніж при перевірному (традиційному) підході. Крім того, рішення, що формуються, безпосередньо пов'язані з конкретними умовами навантаження і спирання конструктиву, що локалізує сферу їх застосування.

Формулюванню відповідних критеріїв в логічно обґрунтованих і фізично виправданих термінах присвячені роботи вчених [64-69].

3.2 Особливості моделювання енергетичного портрету конструкції

Ідеологія постановок задач прямого проектування, що викладається далі, передбачає (нехай і наближено) відображення двох обставин:

- введення в якості критерію єдиної функції мети;

- введення в обмеження умови, пов'язаної з управлінням напружено-деформованим станом (НДС).

У цьому випадку, як відомо, може бути досягнуте значне спрощення постановок задач раціоналізації параметрів конструктиву. Тут передбачається, що однаковий запис функції мети відображає можливість наближеної еквівалентної заміни традиційних критеріїв (вартість, вага, обсяг і т.д.) одним, пов'язаним, при цьому, з характером і особливостями НДС. Аналогічна вимога пред'являється і до обмежень, що задають управління НДС.

У свою чергу, віртуальне різноманіття обмежень, що описують область допустимих рішень (ОДР), зумовило побудову процедури, що складається з двох етапів [63]:

- пошук еталонного рішення;

- формування остаточного рішення.

При цьому, було визнано за доцільне для побудови еталонного рішення використовувати нові положення, засновані на енергетичних принципах [63], а саме:

- твердження про те, що для регульованих систем з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків (зовнішні параметри) під дією статичного зовнішнього навантаження - власної ваги, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягає нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів:

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \qquad k = 1,2,...\infty, \tag{3.1}$$

де U - ПЕД; k - номер варіанта порівняння; $\alpha \in M$; M – безліч допустимих значень зовнішніх геометричних параметрів.

Положення (3.1) може бути поширене на випадок присутності на безлічі віртуальних завантажень домінуючого. Зокрема, при компонуванні тонкостінного елементу, що зазнає деформацію вигину кручення, можна мінімізувати крутний момент за рахунок проходження вектора навантаження через центр вигину, що буде відповідати виконанню (3.1).

Результатом тут буде відмова від формування елемента, що має замкнутий контур (рис.3.1) [63];

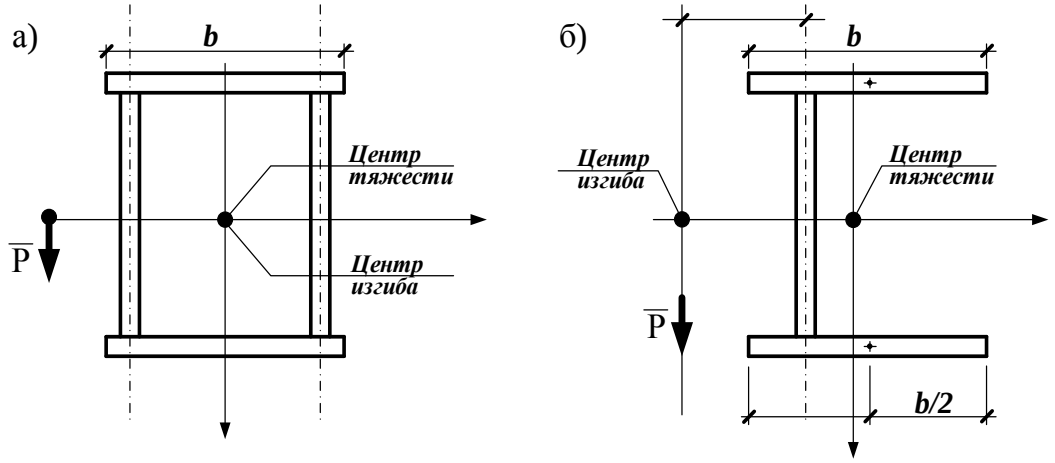


Рисунок 3.1 – Перетини елементів, що зазнають вигин з крученням: а) замкнутий профіль (традиційне рішення); б) відкритий профіль (раціональне рішення).

- вимоги ізоенергетичності стану системи (конструкції), тобто такого при якому: $e[\{\bar{x}\}] = const$, (3.2)

де е - щільність потенційної енергії деформацій (ЩПЕД);

{x} – вектор внутрішніх параметрів.

Рішення практичних завдань з критерієм (3.1), в певній мірі, підтверджує ефективність його експлуатації, а також можливість регулювання не тільки геометричними, але фізико-механічними характеристиками системи [40; 63].

Приймемо, в стилі [63], що під зовнішніми екстенсивними параметрами розуміються параметри, які визначають опірність системи без зміни загального обсягу матеріалу (габарити елементів системи, координати опорних зв'язків і місць прикладання навантажень і т.п.), внутрішні інтенсивні параметри визначають топологію, обсяг, а також властивості матеріалів.

Слід також зазначити, що наслідком першого положення, крім подання (3.1), є наступне:

- при лавиноподібному усунення зв'язків, внаслідок появи пластичних шарнірів, аж до появи граничного стану, коли система перетворюється в механізм, ПЕД зростає і досягає верхньої межі:

$$U_u = \sup U \,, \tag{3.3}$$

де U_u - гранична величина ПЕД.

Умова (3.3) може бути використана при визначенні найбільш небезпечного поєднання навантажень, в разі різноманіття завантажень. Очевидно, що найбільш небезпечному завантаженню (у випадку пружного деформування) буде відповідати більша величина ПЕД;

Наслідком критерію (3.2) є те, що при $e = e_u$ у всіх точках конструкції досягається глобальний мінімум витрат матеріалів (3.1). Тут фундаментальна структуроутворююча величина e_u - ресурс, суть - міра в'язкості матеріалу або гранична щільність енергії деформування [63]. Вона визначається роботою, що витрачається на деформацію зразка аж до його руйнування, що припадає, на одиницю об'єму і вимірюваної площею індикаторної діаграми деформування матеріалу. З величиною ресурсу пов'язано дуже цінна якість конструкції - резільянс, який визначається кількістю пружної енергії, яку можна запасти в ній. У свою чергу, ізоенергетичність, породжувана (3.2), як раціональна форма існування штучних елементів, забезпечує найбільш прийнятний розподіл матеріалу, а також його ефективну роботу в конструкції. Застосовуючи до (3.2) ітераційний підхід, який базується на методі адаптивної еволюції (МАЕ), для будь-якого геометричного або фізико-механічного параметра конструкції можна записати [40]:

$$h_{i+1} = h_i [e_i e_{iu}^{-1}]^{\gamma} \,, \tag{3.4}$$

де h – геометричний (фізико-механічний) параметр системи;

i – номер ітерації;

$\gamma \in (0,1)$ - характеристика адаптивної еволюції, що відображає швидкість збіжності.

Введені положення дозволяють не тільки позначити еталонне рішення, але і, що є дуже важливим, побудувати енергетичний портрет конструкції. Під енергетичним портретом конструкції розуміється 3D-побудова і відображення поля щільності енергії деформації з одночасним визначенням ПЕД. Дана обставина, поряд з визначенням раціональної топології системи (не тільки форма, а й зміст) зумовлює встановлення граничного стану як для структурних елементів конструкції (наприклад, скінченних елементів) так і для системи в цілому. Крім того, за умови збіжності процедури (3.4), відбувається відсів ненавантажених (паразитуючих) елементів системи. Відзначимо, що крім мінімізації витрат матеріалів критерії (3.1) ÷ (3.2) можуть бути використані для наближеної оцінки деяких важливих механічних характеристик.

3.3 Процедури покращення конструктивних характеристик оболонок

Реалізація підходу передбачає побудову взаємозв'язку між величиною енергії деформації системи і однієї або групи геометричних параметрів. Постановка подібної задачі в численному вигляді можлива при застосуванні обчислювальних програмних комплексів, однак, операція передбачає побудову значної кількості моделей, що в певній мірі ускладнює процес.

Представлена постановка і реалізація завдання раціоналізації конструктивних параметрів запропонованих залізобетонних оболонок. В якості критерію для даної задачі приймається енергетичний принцип, згідно з яким вважається, що з усієї безлічі можливих значень шуканих параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягне нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів, що описують систему. Реалізація підходу, у даному випадку, передбачає побудову

взаємозв'язку між величиною енергії деформації системи і одного або групи геометричних параметрів.

В роботі реалізовані чисельні методи вирішення поставленого завдання на прикладі циліндричної оболонки, що має внутрішні порожнини прямокутної в плані форми (рис. 3.2.).

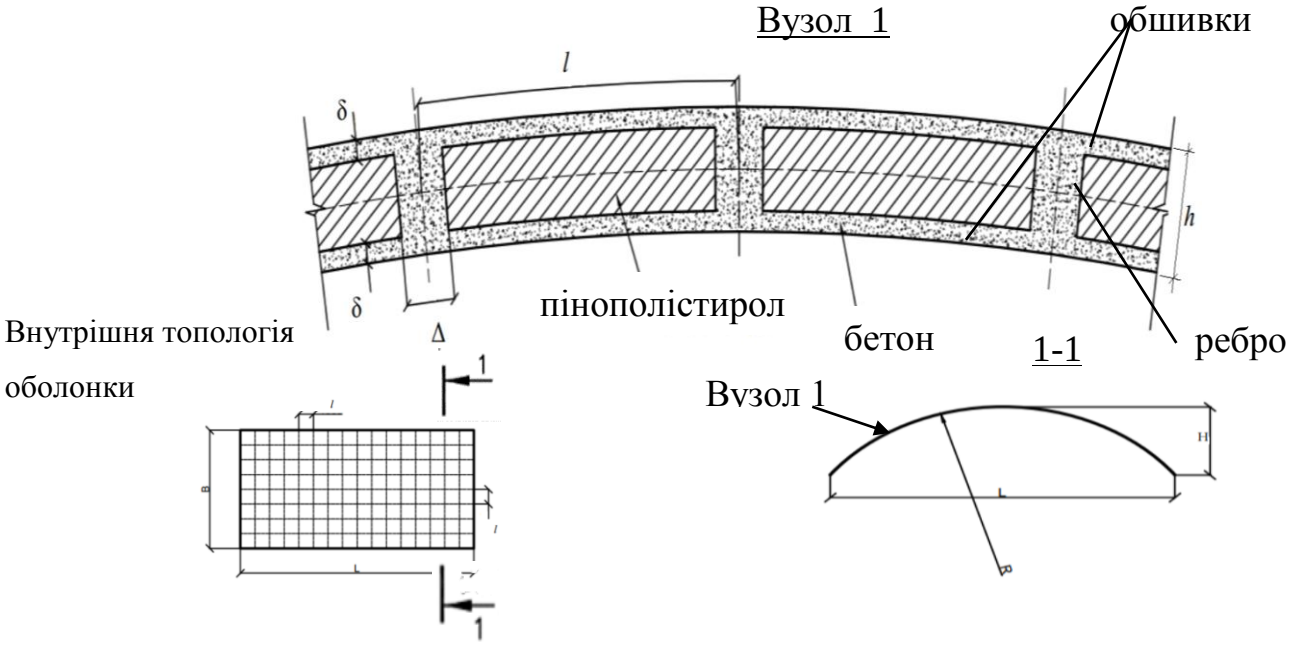


Рисунок 3.2. Розглянута оболонка

У розгляд вводиться вектор керуючих параметрів даної системи:

$$\{x\}^T = \{H, B, V, R, L, l, q, \delta, \Delta, h\}, \tag{3.5}$$

де H – стріла підйому; B – довжина оболонки; V – об’єм матеріалу; R – радіус кривизни; L – проліт оболонки; l – крок ребер; q – зовнішнє навантаження; δ – товщина обшивок; Δ – товщина ребер; h – висота перерізу оболонки.

При цьому параметри H, B, R, L, q – позиціонуються як зовнішні, а параметри l, δ, Δ, h – як внутрішні.

За інструментарій для вирішення поставленого завдання використовувалась зв’язка програмних продуктів компанії Autodesk. Основоположним тут є скрипт, розроблений у середовищі візуального програмування Dynamo, який дозволяє автоматично формувати геометрію оболонки шляхом задавання всіх необхідних параметрів із числа {x}. У загальному вигляді процедура визначення НДС оболонки представлена алгоритмом (рис. 3.3.).

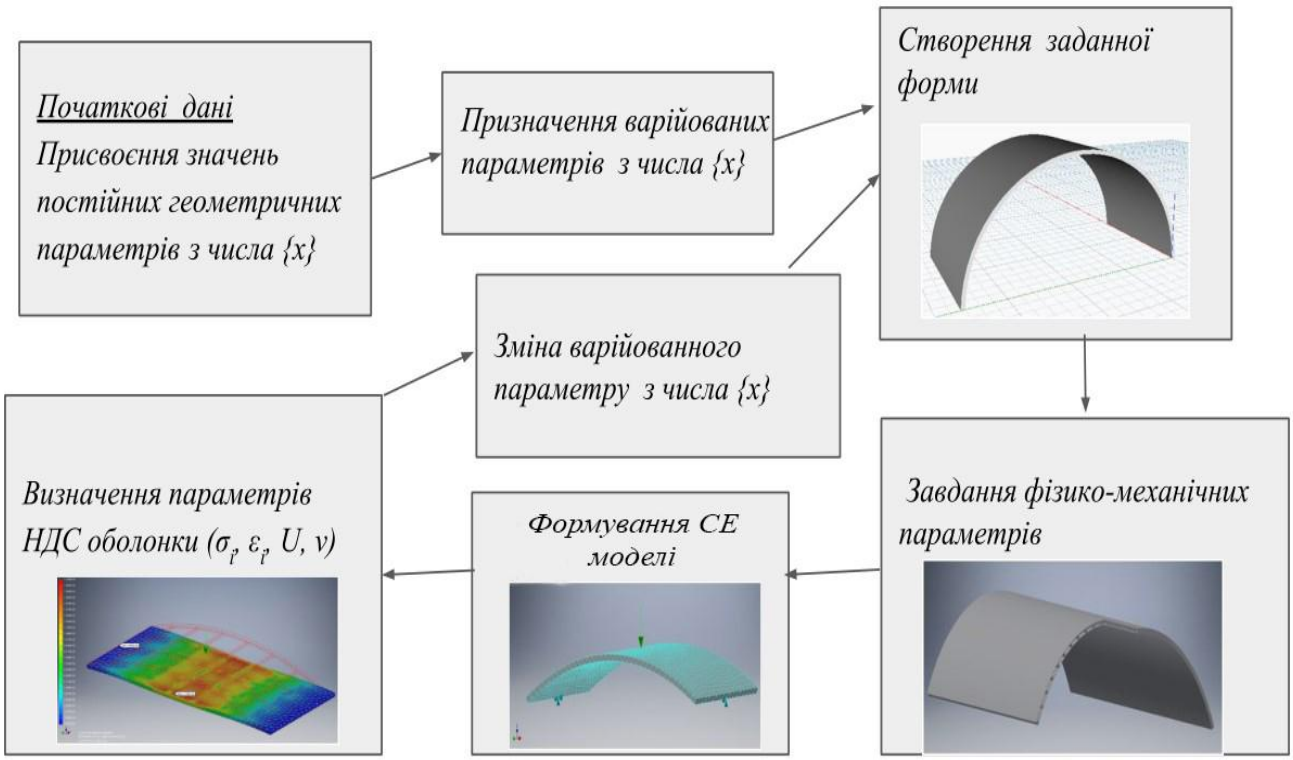


Рисунок 3.3. Блок-схема алгоритму обчислювання НДС системи

Запропонована процедура дозволяє в автоматичному режимі вибудовувати взаємозв’язок між ПЕД системи і будь-яким геометричним параметром, що її описує. Для ілюстрації розглянуто приклади пошуку зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів оболонки. При аналізі зовнішніх параметрів як змінний прийнято стрілу підйому H $\in$ (H [0; L / 2]), інші параметри, що описують геометрію системи, прийнято такі: B = 9000 мм;

L = 18000 мм; h = 300 мм, Δ = 100 мм; l = 1000 мм. В якості навантаження прийнято власну вагу, обпирання призначено шарнірно нерухомим за двома поздовжніми ребрами, матеріал – бетон С25/30. Покрокове змінюючи параметр H, визначено його взаємозв'язок із величиною ПЕД системи, при цьому в усіх випадках об'єм матеріалу оболонки досі був незмінний – його сталість забезпечувалась шляхом підбору відповідного значення товщини обшивки δ. Результати розрахунку наведені в табл. 3.1.

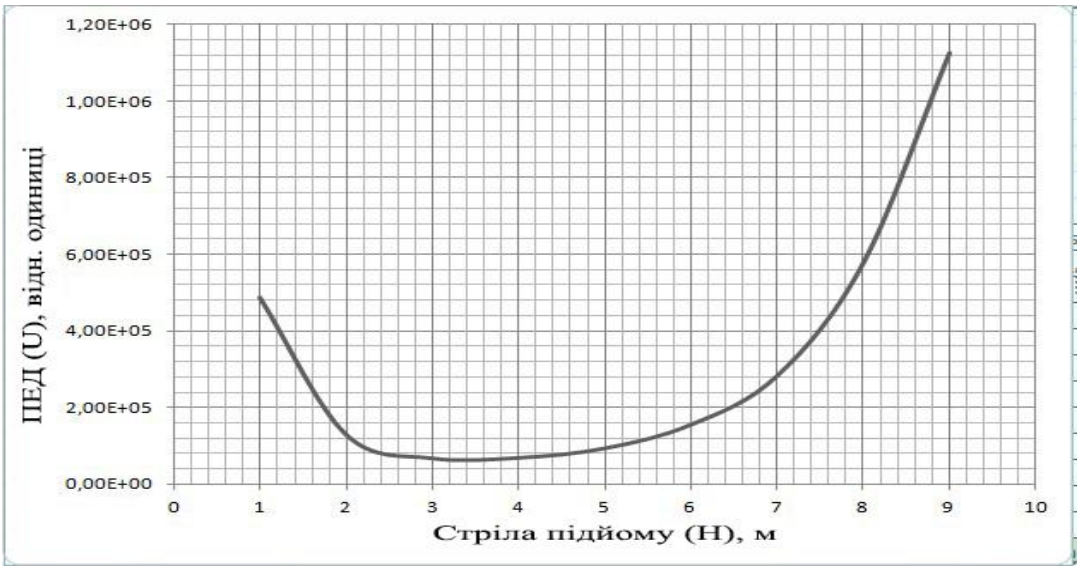
Таблиця 3.1.

Результати розрахунку

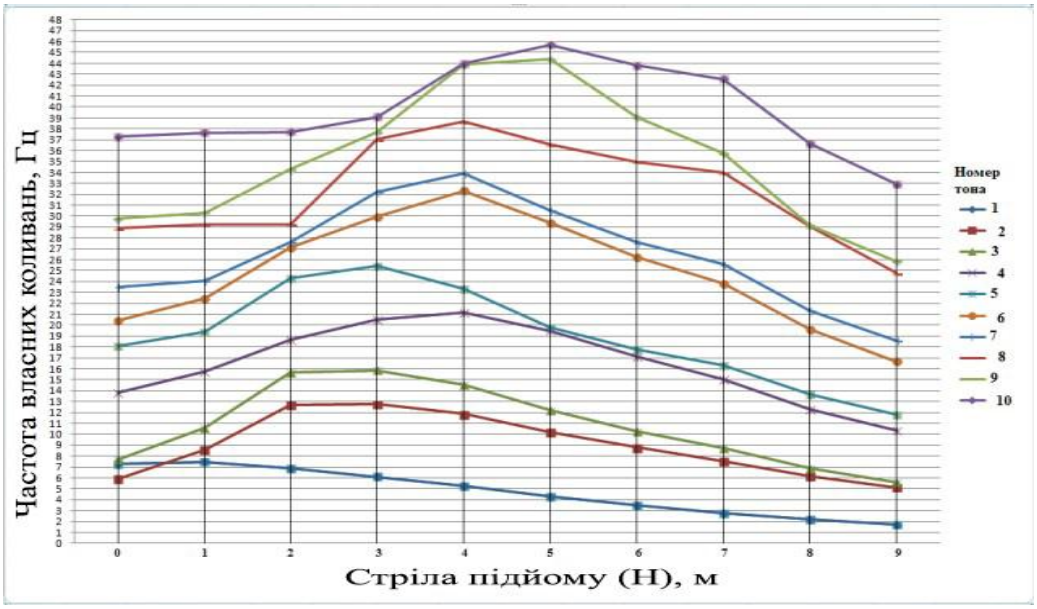
Стріла підйому H	**Об'єм матеріалу V**	**Радіус кривизни R**	**Товщина обшивок δ**	**Довжина дуги**	**ПЕД системи U**
м	**$м^3$**	**м**	**мм**	**м**	**відн. од**
0	22,89	∞	50,60	18,00	5,75E+06
1	22,89	41,00	50,00	18,14	4,87E+05
2	22,89	21,25	47,30	18,58	1,30E+05
3	22,89	15,00	45,0	19,30	7,57E+04
4	22,89	12,12	40,70	20,28	6,93E+04
5	22,89	10,60	35,70	21,50	9,38E+04
6	22,89	9,75	31,50	22,93	1,55E+05
7	22,89	9,28	27,10	24,55	2,83E+05
8	22,89	9,06	22,40	26,34	5,77E+05
9	22,89	9,00	18,70	28,27	1,12E+06

На підставі отриманих даних побудовано графік залежності ПЕД від стріли підйому H (рис. 3.4., а), який уявляє собою унімодальну функцію. Визначено, що для заданих умов при H ≈ 3,8 м ПЕД досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень H та оцінки максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки. З

графіків (рис. 3.4. б), а також на рис.3.5-3.16 видно 7 із 10 тонів власних коливань приймають максимальне значення при значенні Н близькому до раціонального. З умови досягнення еквівалентних напружень системи (σ_e) межі міцності матеріалу визначена q_{max} для оптимального значення Н і значень на 1 м більше і менше від раціонального (4,8 і 2,8 м відповідно). Так при Н = 3,8м q_{max} = 38,45 кН/м^2; при Н = 4,8 м q_{max} = 35,15 кН/м^2; при Н = 2,8 м q_{max} = 30,26 кН/м^2.



а)



б)

Рисунок 3.4. Взаємозв'язок стріли підйому Н і:

а) ПЕД; б) частот власних коливань

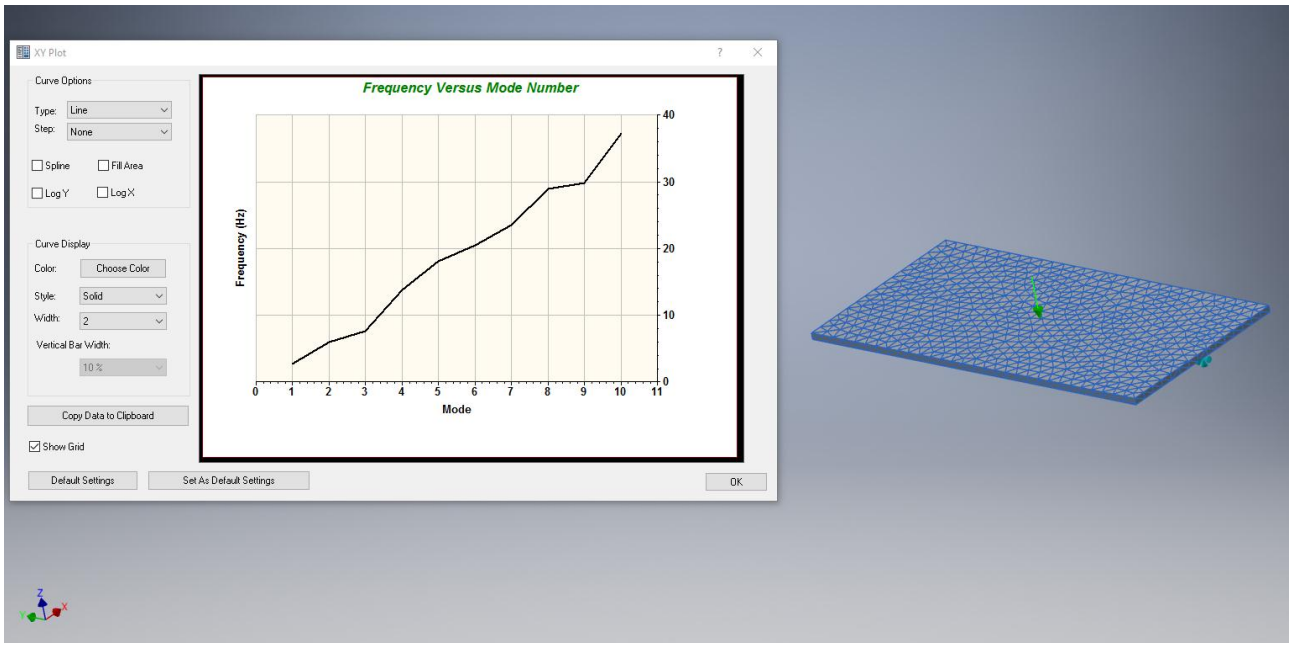


Рисунок 3.5. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 0,1 мм.

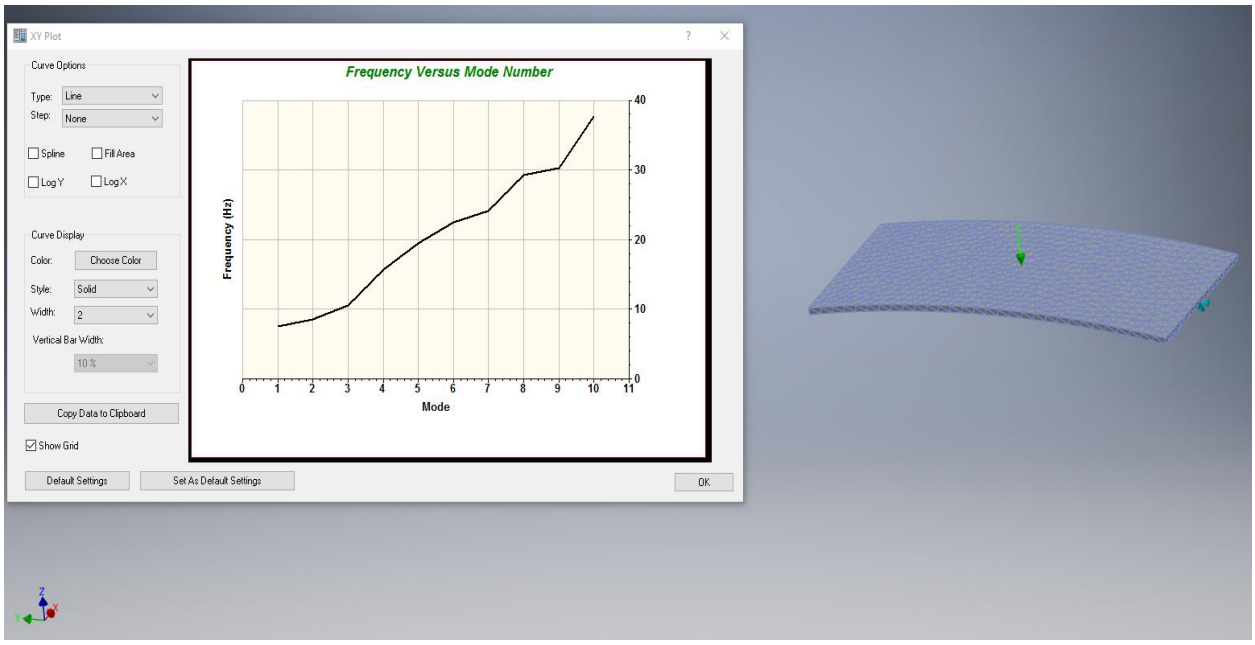


Рисунок 3.6. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 1000 мм.

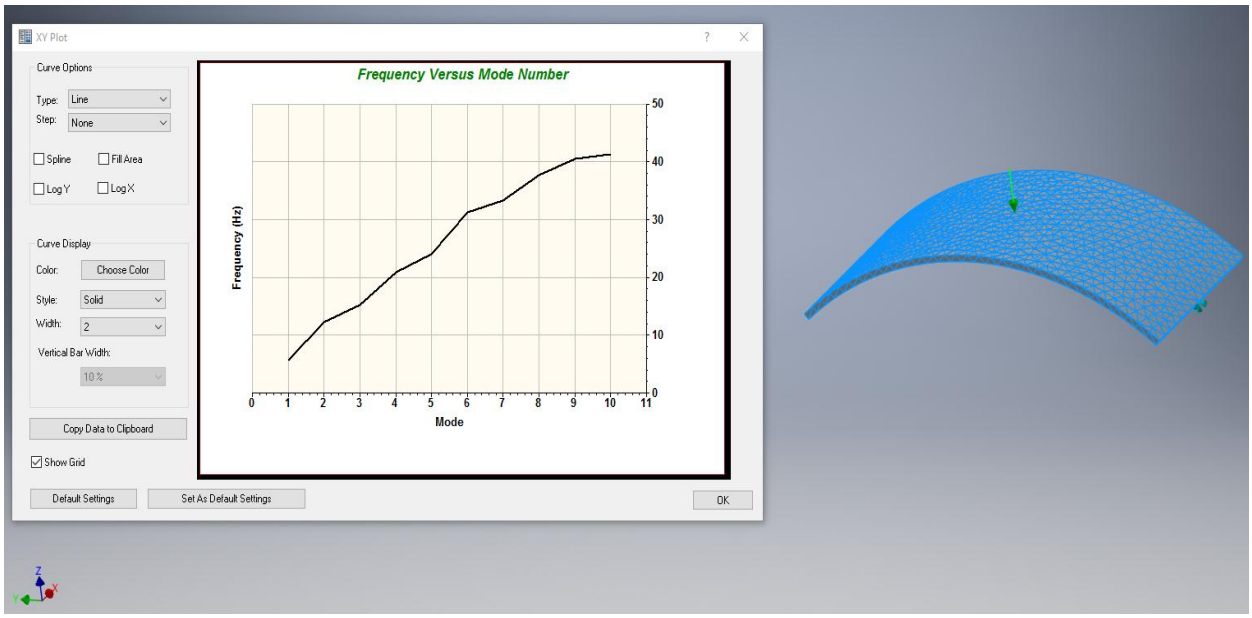


Рисунок 3.7. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 3500 мм.

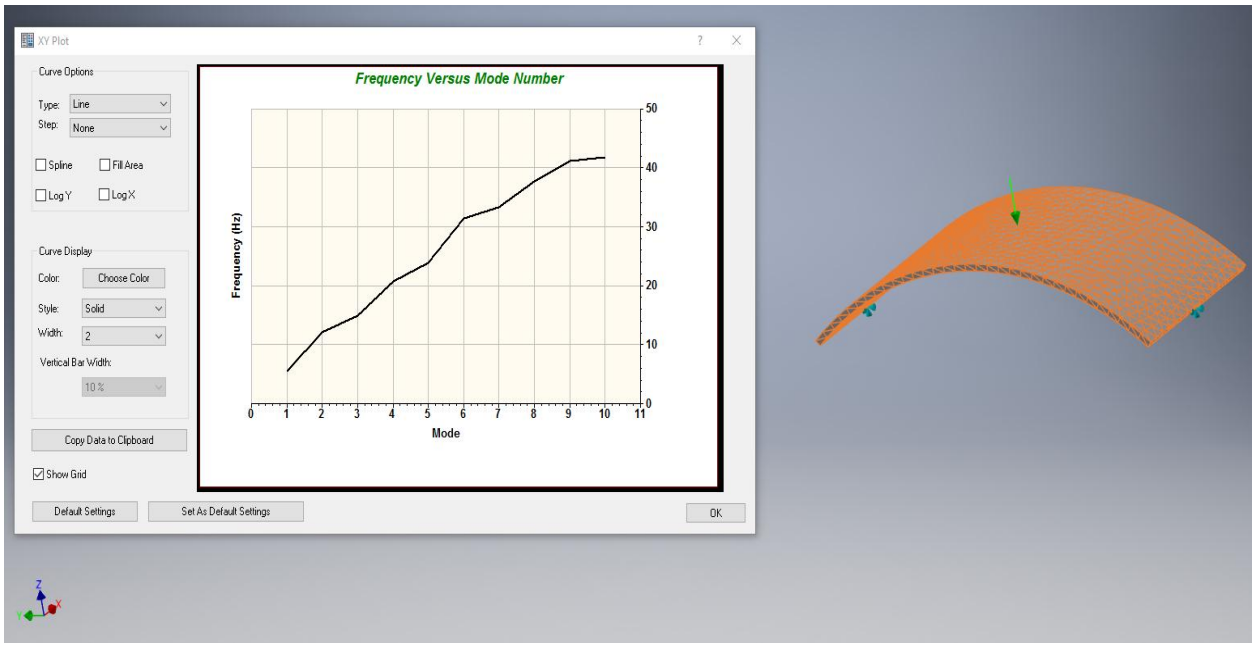


Рисунок 3.8. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 3600 мм.

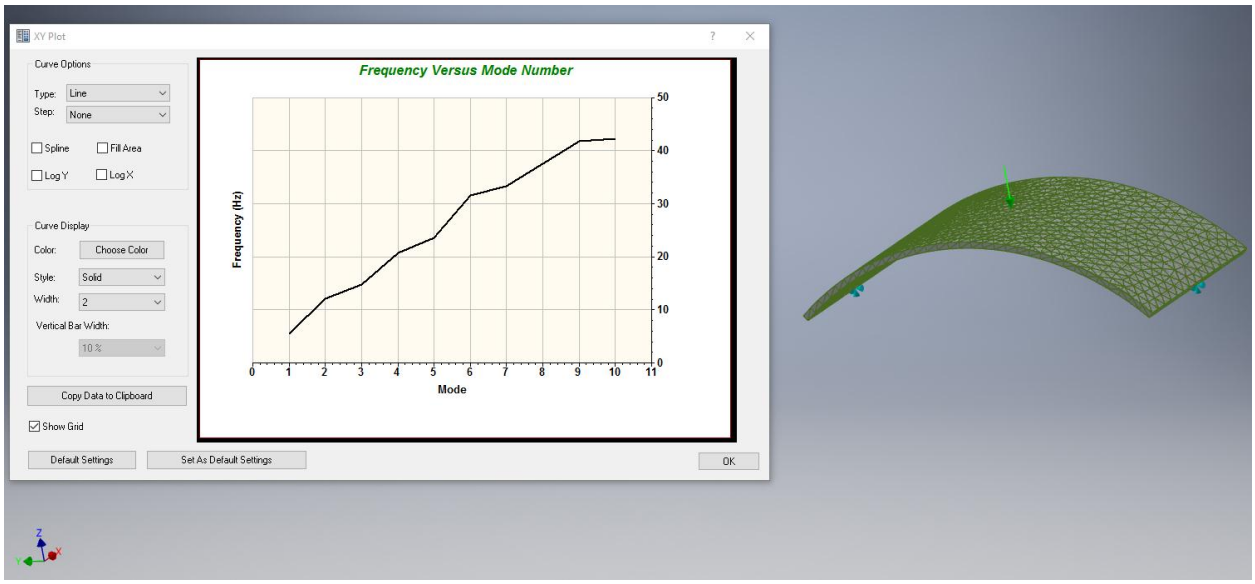


Рисунок 3.9. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 Х3700 мм.

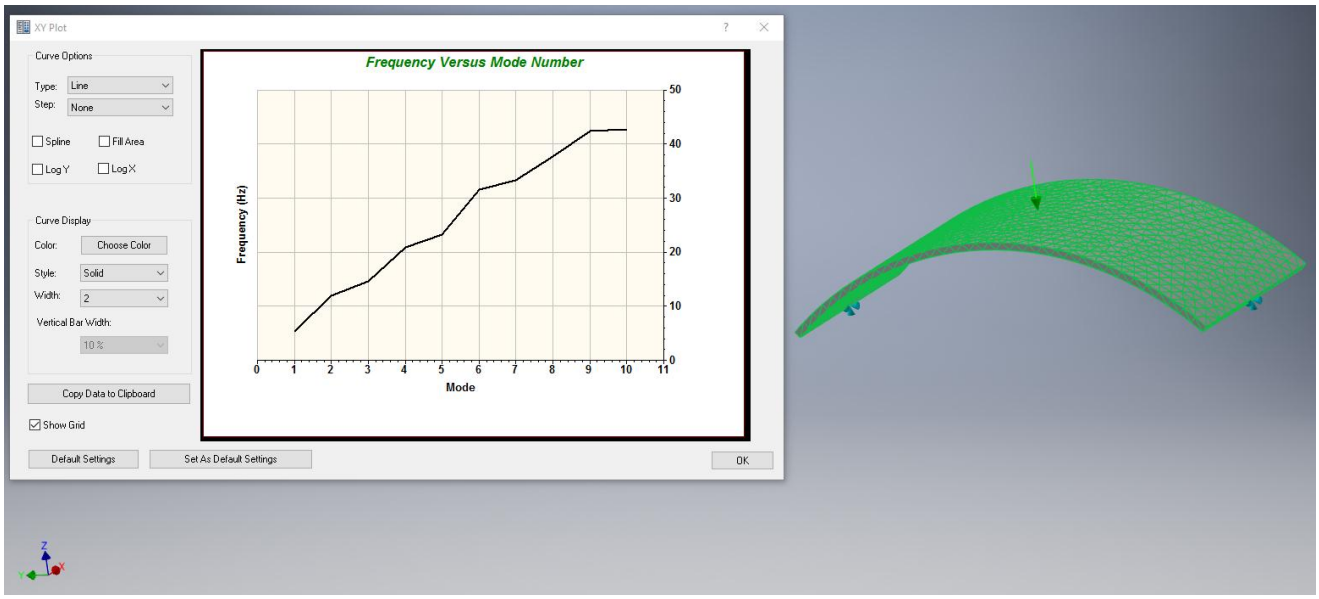


Рисунок 3.10. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 Х 3800 мм.

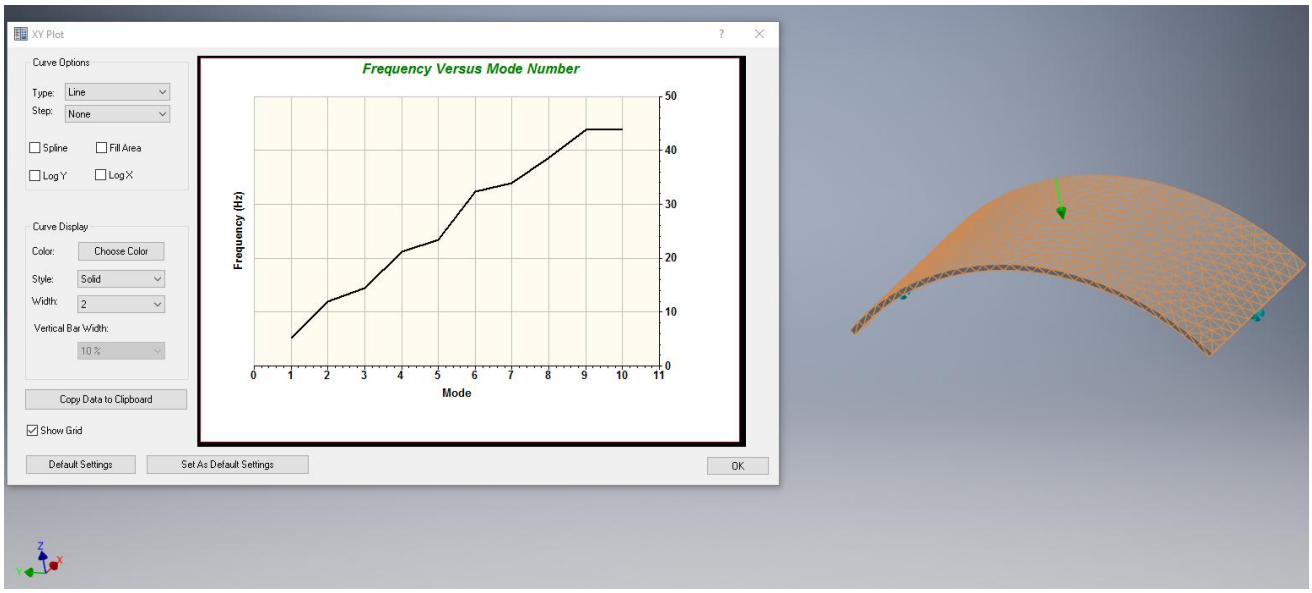


Рисунок 3.11. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 Х4000 мм.

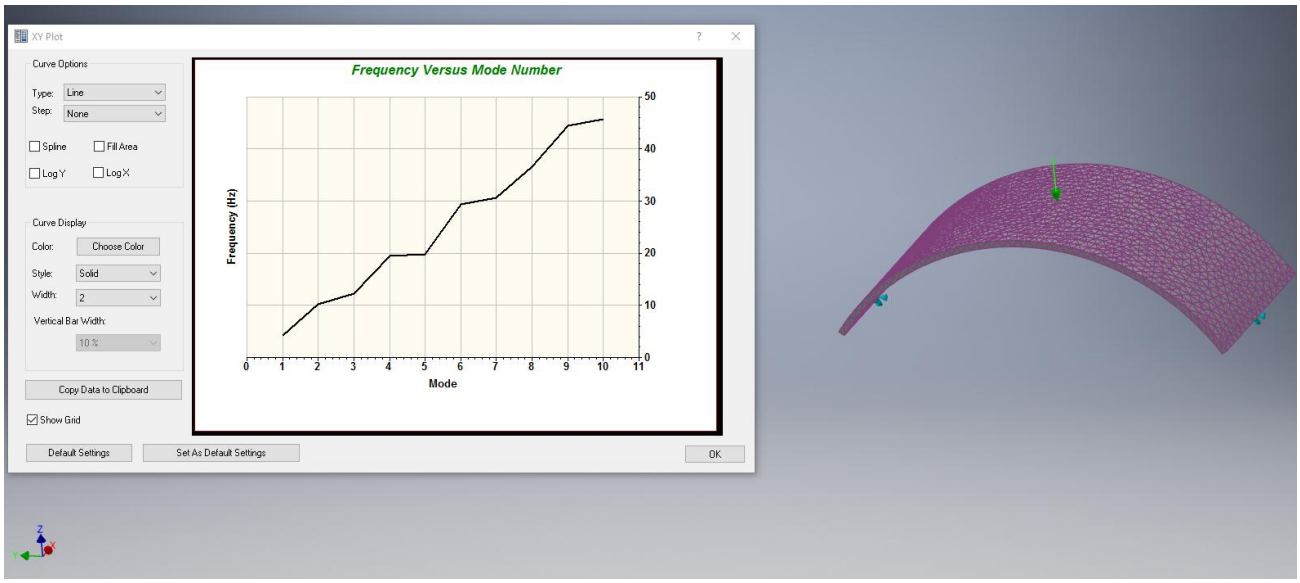


Рисунок 3.12. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 Х 5000 мм.

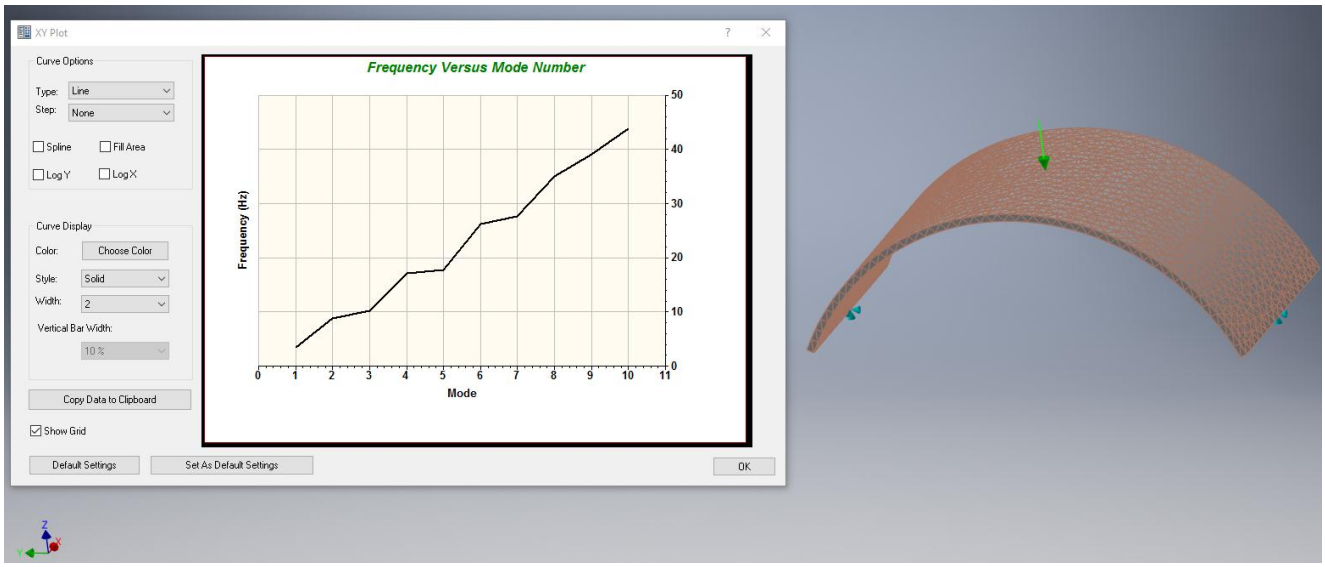


Рисунок 3.13. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000X6000 мм.

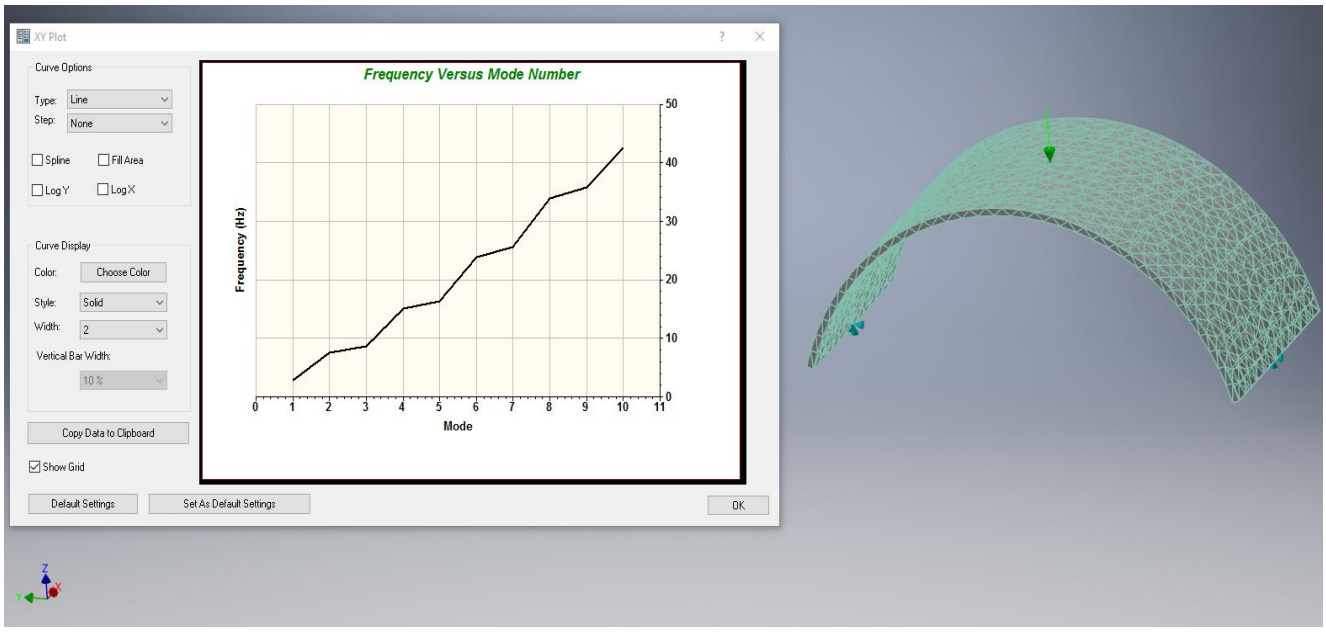


Рисунок 3.14. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 7000.

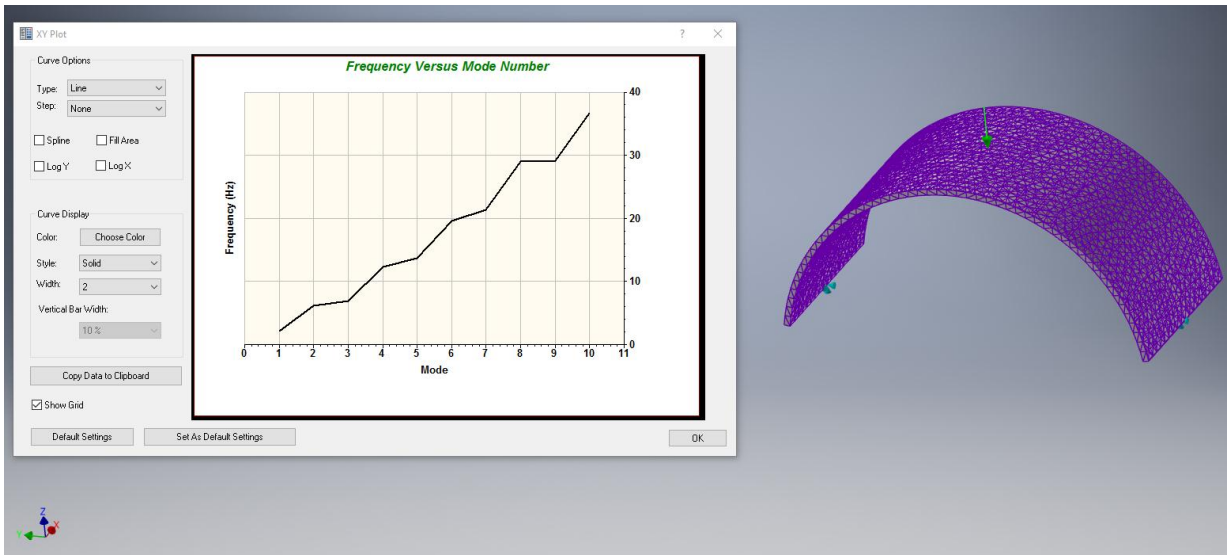


Рисунок 3.15. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 8000 мм.

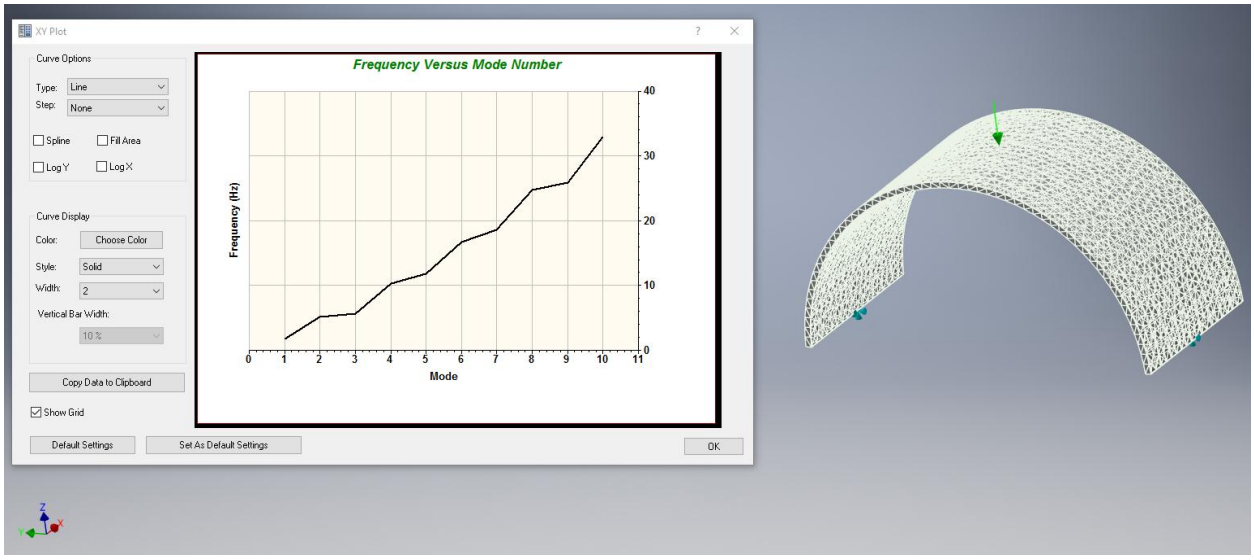


Рисунок 3.16. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 X 9000 мм.

Для подальшого аналізу в якості змінних параметрів прийнято крок внутрішніх ребер оболонки *l* (рис. 3.17). Решта атрибутів розрахункової моделі задані по аналогії з прийнятими раніше за винятком товщини обшивки δ, яка в даному випадку прийнята рівною 50 мм, і стріли підйому H, прийнятої 3,8 м. Сталість обсягу матеріалу, в даному випадку, забезпечувалося шляхом підбору

відповідного значення товщини ребер Δ. Результати розрахунку наведені в табл. 3.2, і на графіку (рис. 3.18).

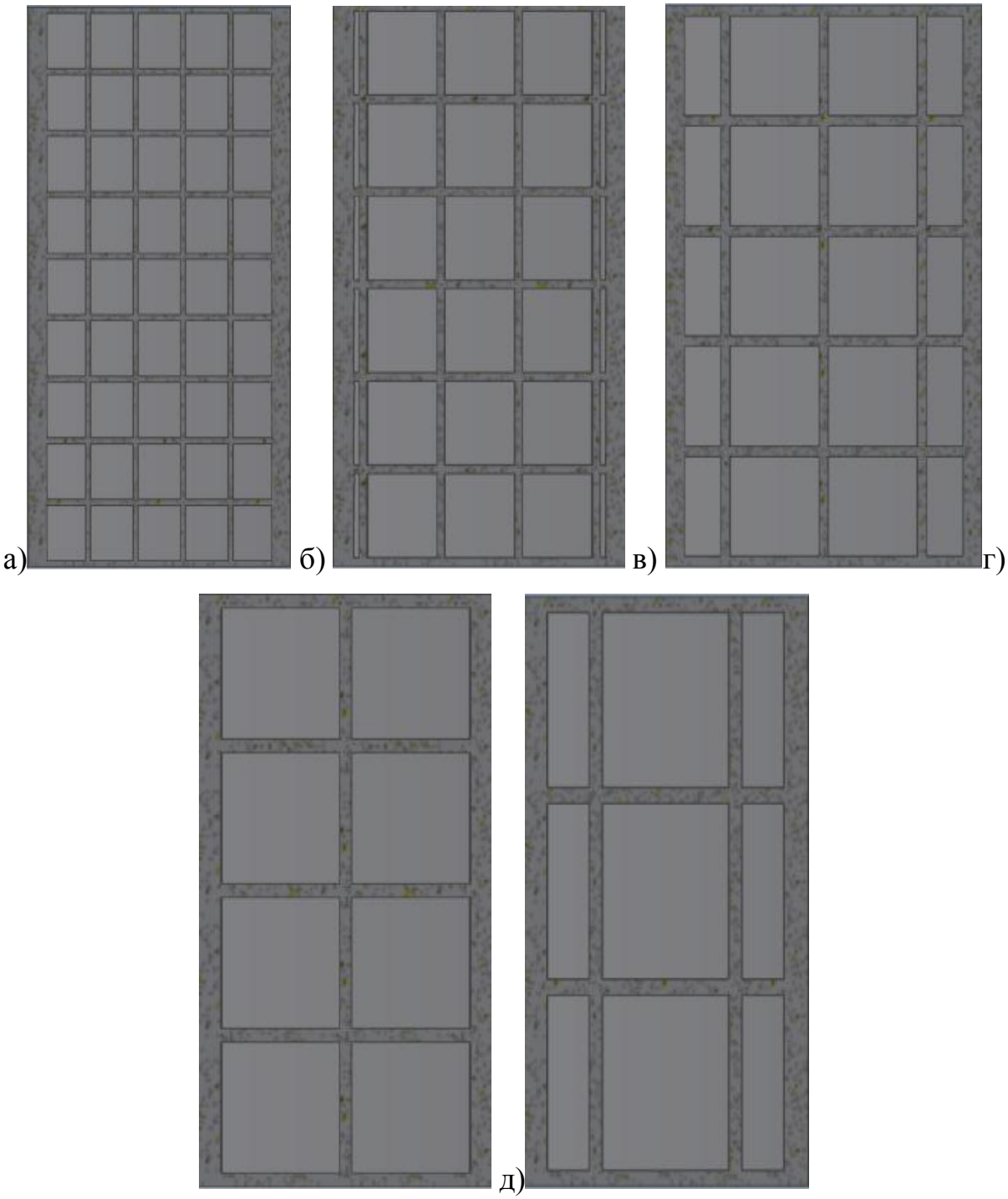


Рисунок 3.17. Варіювання сіткою ребер. Крок ребер.

а) 1000 мм; б) 1500 мм; в) 2000 мм; г) 2500 мм; д) 3000 мм.

Таблиця 3.2.

Результати розрахунку

Крок ребер, *l*	**Товщина ребер, Δ**	**Об'єм матеріалу, V**	**ПЕД системи, U**
мм	**мм**	**$м^3$**	**відн. од.**
500	50	23,509	1,25125
1000	96,5	23,509	1,250747
1500	137,7	23,509	1,253351
2000	166,9	23,509	1,260031
2500	207,3	23,509	1,267818
3000	241,1	23,509	1,297566

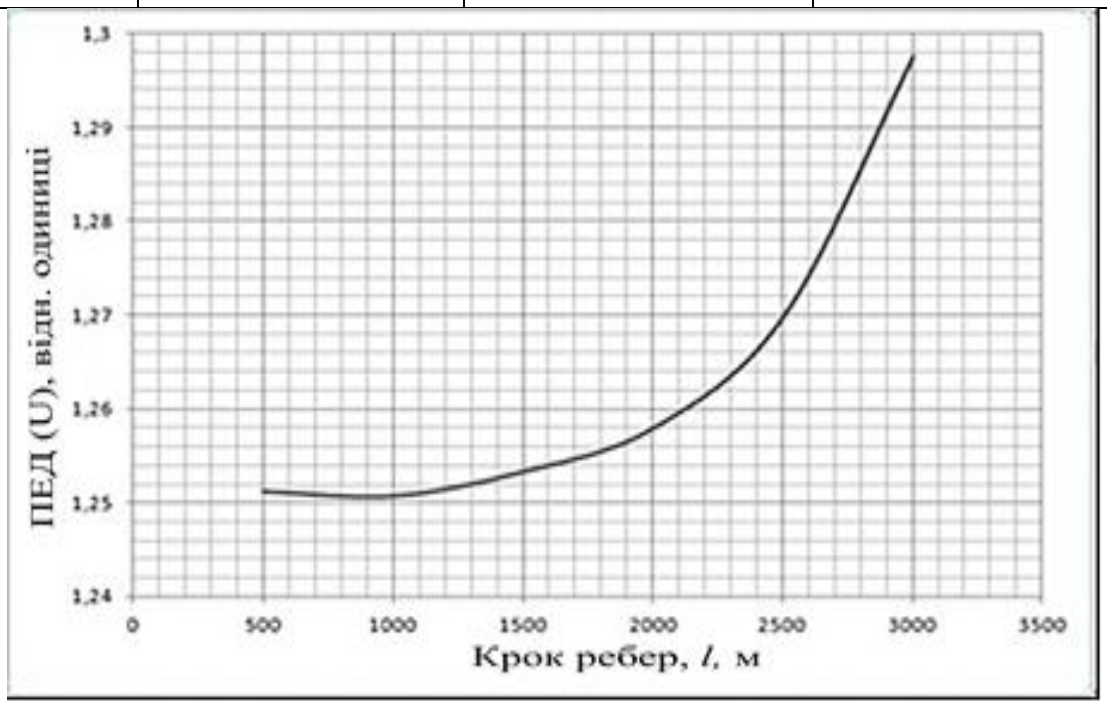


Рисунок. 3.18. Графік залежності енергії U деформації від кроку ребер

Як видно з графіка, при величині кроку ребер близькою до l ≈ 1000 мм ПЕД досягає нижньої межі. Таким чином, запропонований підхід відкриває

можливість визначення раціональних параметрів залізобетонних елементів, що мають складну зовнішню і внутрішню геометрію.

Наведений аналіз розширено завдяки вивченню розподілу щільності енергії деформації (внутрішній параметр). В даному випадку, критерієм буде залежність

$$e \rightarrow const, \qquad (3.6)$$

де e - щільність потенційної енергії деформації (ЩПЕД).

Вирівнювання поля ПЕД (ПК «Ліра») реалізовано за рахунок надання вкладишам-пустотоутворювачам складної форми. В цьому разі, сітка ребер не є ортогональною.

В роботі виконані чисельні дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямах. Визначен взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропної оболонки між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів: при величині кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі. Отримані результати зовнішніх параметрів верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень стріли підйому H і максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки. Визначено, що для заданих умов при стрілі підйому $H \approx 3{,}8$ м ПЕД досягає нижньої межі.

В додатку В наведені поля щільності потенційної енергії деформації залежно від кроку ребер та висоти стріли.

3.4. Висновки до розділу 3

1. У роботі продемонстровані принципи оптимізації процесів проектування, які основані на взаємозв`язку чисельних і графічних програмних комплексів. Застосован енергетичний критерій, що до раціоналізації зовнішніх

конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок.

2. За результатами дослідження визначено, що (для розглянутих конкретних умов) при H ≈ 3,8 м потенційна енергія деформації досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень H та оцінки максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки.

3. Визначен взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропної оболонки між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів: при величині кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК, ЩО ПРОПОНУЄТЬСЯ

4.1 Мета та задачи експерименту

Розділ присвячено експериментальним дослідженням напружено-деформованого стану моделей оболонок при випробуванні їх гідравлічним методом.

В рамках проведеного дослідження була виконана оцінка вогнестійкості конструктивно-анізотропних залізобетонних конструкцій у вигляді чисельного експерименту, що моделює роботу конструкції при односторонньому нагріванні у режимі стандартної пожежі.

Поставлені в роботі завдання вирішувались із застосуванням методів, що базуються на основних положеннях фізичного і математичного моделювання.

Об'єкт дослідження - моделі циліндричної та сферичної оболонок з розмірами в плані 2200х2200 мм, виконаний у вигляді зовнішньої і внутрішньої бетонної обшивки товщиною 50 мм, між якими розташований вкладиш-пустотоутворювач з екструдованого пінополістиролу товщиною 150 мм. Армування обшивок виконано сіткою з коміркою 200х200 мм, d = 6 мм, А-240С. За діагональним напрямкам оболонки розташовані, забезпечуючі спільну роботу обшивок, ребра шириною 50 мм, які армовані плоским каркасом з арматурою d = 10 мм, А 400С. Загальна схема конструкції наведена на рис.4.1, 4.2.

Предмет дослідження – характер деформування об'єкту дослідження.

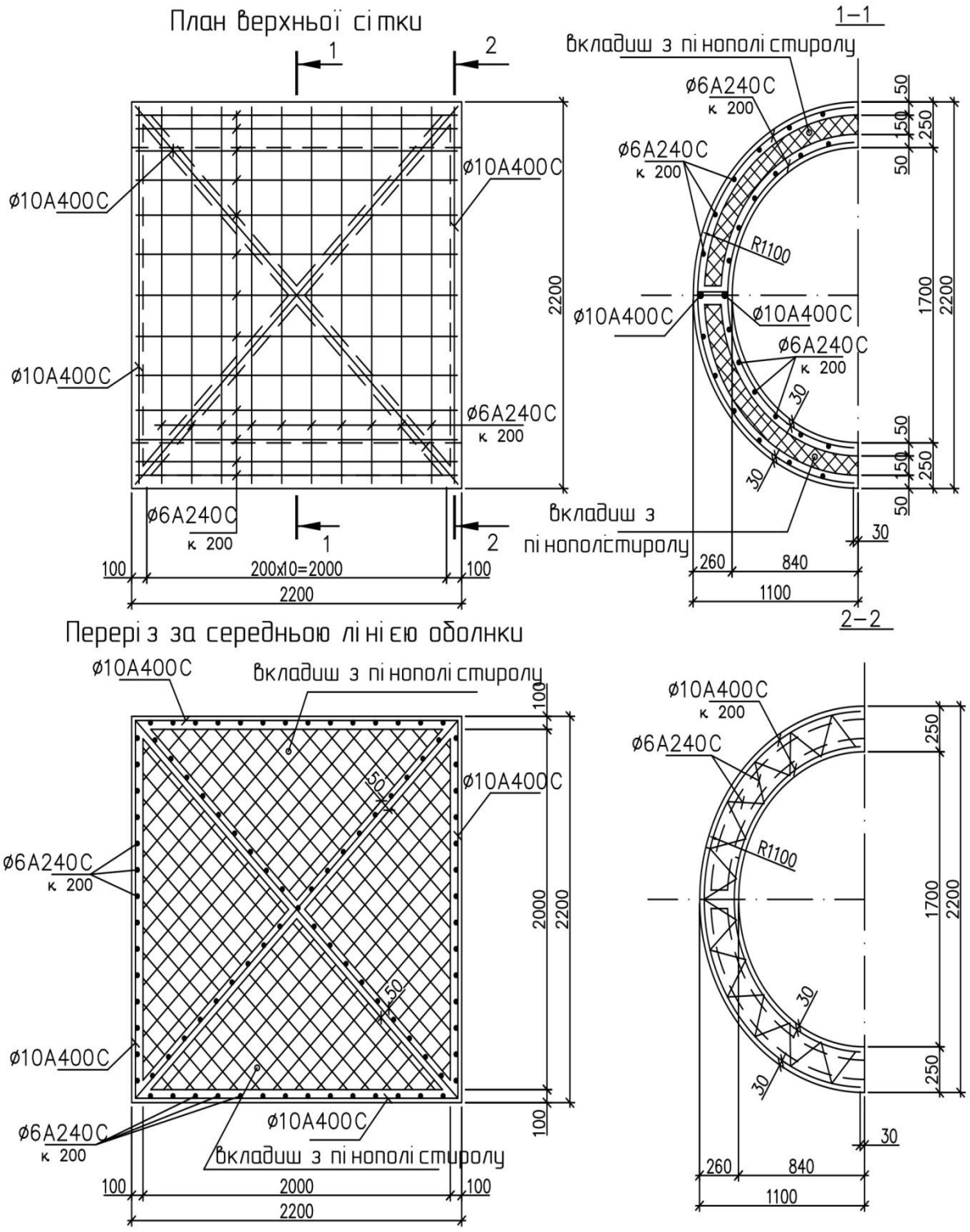


Рисунок 4.1. Геометрія і армування циліндричної оболонки

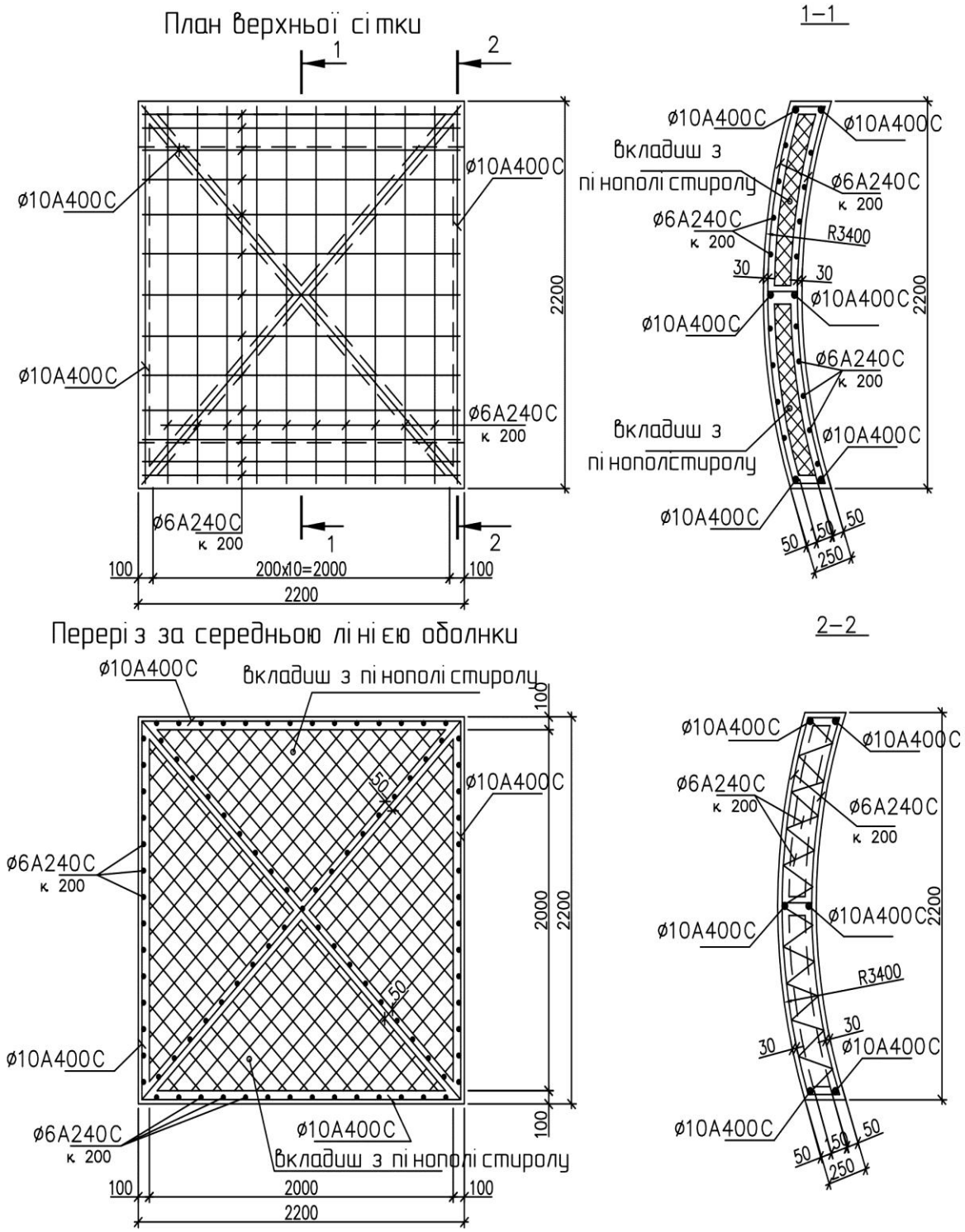


Рисунок 4.2. Геометрія й армування сферичної оболонки

4.2 Спосіб для натурних випробувань конструктивно-анізотропних оболонок різної гаусової кривизни

Створення спосібу для натурних випробувань оболонок різної гаусової кривизни шляхом моделювання різних схем рівномірно-розподіленного та зосередженого навантаження на плити та оболонки дає можливість отримувати більш точні та достовірні результати досліджень.

У запропонованому способі [70, 71] натурних випробувань плит і оболонок, шляхом впливу на їх поверхню тиском стовпа рідини, що заключається у встановленні випробуваного зразка на опору, спорудженні безпосередньо над ним басейну, обмеженого встановленими по контуру випробуваного зразка щитами і розділеного за допомогою перегородок на окремі частини, та заповненні цього басейну водою. Перегородки розташовують таким чином, що вони утворюють чарункову систему розподілу навантаження на будь-яку криволінійну поверхню випробуваного зразка. Після чого встановлюють в чарунки гідроізолюючі поліетиленові футляри, дно яких безпосередньо контактує з поверхнею випробуваного зразка, і заповнюють їх водою, з можливістю прикладання гідравлічного тиску послідовно, зосереджено або ступенево до будь-якої частини або всієї поверхні випробуваних плит і оболонок різноі гаусовоі кривизни.

На рис.4.3 показаний стенд [70, 71] для натурних випробувань плит і оболонок, що використовується для здійснення запропонованого способу, який складається з встановленого на каркасі 1 зовнішніх бортів басейну 2, який розподілений жорсткими перегородками 3 на чарунки 4, стінки яких доходять до верхньої поверхні випробуваного зразка, зображеного на перетині 1-1 (рис.4.4), але не опираються на нього, всередині яких знаходяться спеціально виготовлені поліетиленові футляри 5, які виконують роль гідрофобної плівки,

що в цілому забезпечує герметичність басейну, дно яких безпосередньо контактує з поверхнею випробуваного зразка.

На рис. 4.4 приведений перетин 1-1 рис. 4.3, що складається з каркасу - 1, на якому встановлений випробуваний зразок 6 і зовнішні борти басейну - 2, який розподілений жорсткими перегородками 3 на чарунки 4, стінки яких доходять до верхньої поверхні випробуваного зразка 6, але не опираються на нього, всередині яких знаходяться спеціально виготовлені поліетиленові футляри 5.

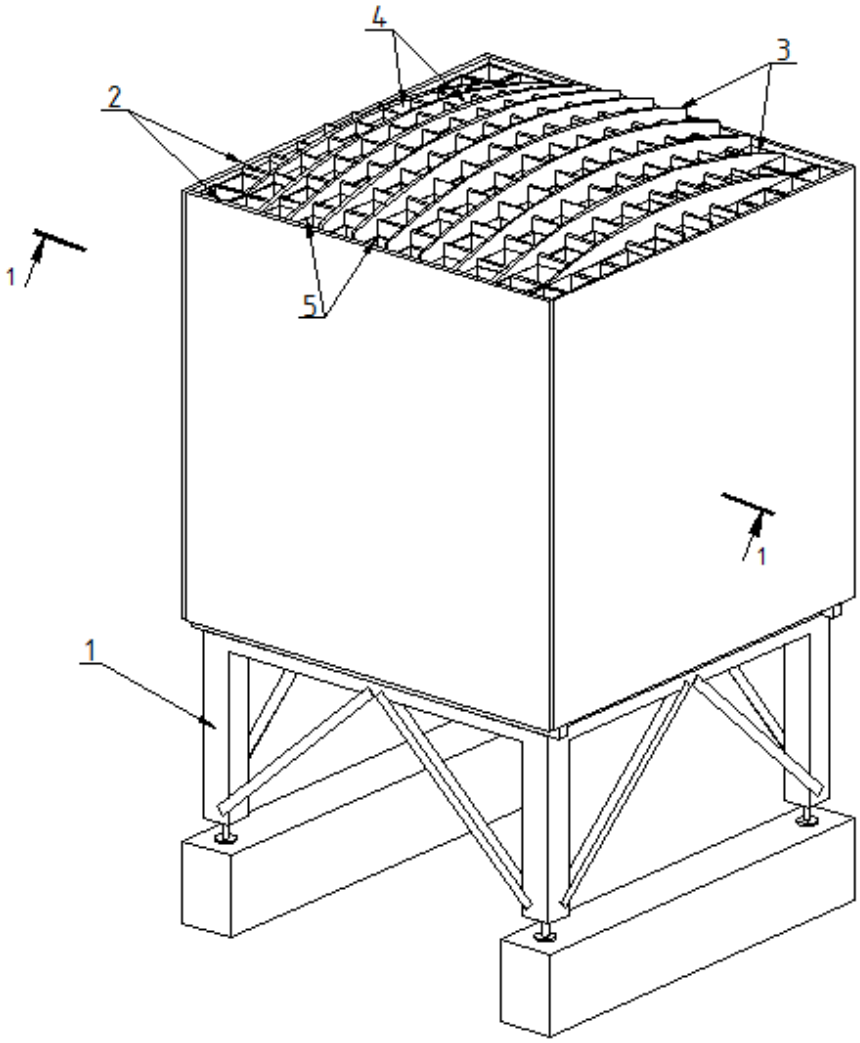


Рисунок 4.3. Стенд для натурних випробувань плит і оболонок.

1-1

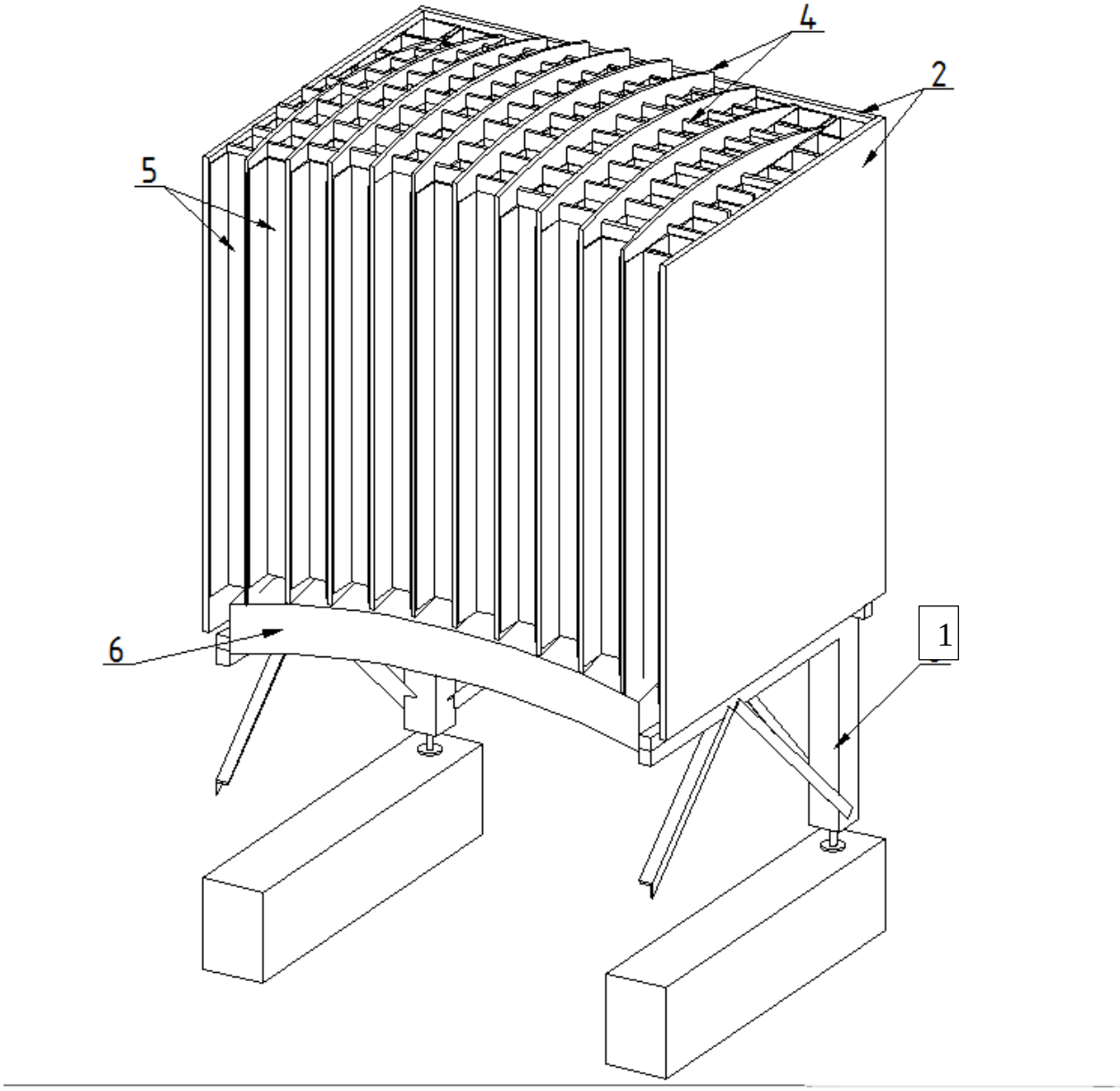


Рисунок 4.4. Перетин стенду для натурних випробувань плит і оболонок

Для проведення експериментальних досліджень описана оболонка була встановлена на спеціально виготовлений каркас (рис.4.5, 4.6), виконаний з профілю квадратного перерізу 100х100х6 мм.

Конструкція каркаса умовно забезпечувала точкове обпирання оболонки по чотирьох кутах. Висота каркаса для випробовувань була підібрана з урахуванням зручності доступу до нижньої поверхні оболонки, де розміщувалися вимірювальні прилади.

4.3 Система навантаження.

Відповідно до обраної програми експерименту задавався режим навантаження. Рівень навантаження визначає висота стовпа води в резервуарі. При цьому, згаданий необхідний рівень забезпечується системою подачі і відведення води в резервуар і з нього. Для реєстрації вимірюваних атрибутів до досліджуваного об'єкта були підведені індикатори, що дозволяють встановити характеристики напружено - деформованого стану об'єкта дослідження. Основою для позначених випробувань стало пристрій для натурних випробувань плит і оболонок при дії вертикальних короткочасних і тривалих навантажень (рис.4.7.,4.8) [41].

За кожною з схем проведених експериментів виконувалося 6 незалежних циклів завантаження/розвантаження. До аналізу бралися усереднені дані за результатами проведення шести завантажень, що наведені у таблицях 4.1,4 2.

Рисунок 4.5. Каркас для випробувань

Рисунок 4.6. Встановлена циліндрична оболонка на каркас для випробувань

Рисунок 4.7. Стенд для випробувань сферичної оболонки

Рисунок 4.8. Стенд для випробувань циліндричної оболонки

З огляду на складність конфігурації навантажуємої поверхні циліндричної оболонки, для рівномірного розподілу тиску від стовпа води стало необхідним спорудження додаткових перегородок усередині басейну в поздовжньому напрямку. Таким чином, побудований над циліндричною оболонкою басейн мав комірчасту систему, що складалася з 11 осередків розмірами 200х2200 мм висотою 1200 мм. (рис.4.9-4.12.)

Рисунок 4.9. Чарункова система стенду над циліндричною оболонкою для проведення випробувань

Рисунок 4.10. Щити, що утворюють басейн над циліндричною оболонкою.

Рисунок 4.11. Чарункова система, споруджена над сферичною оболонкою

Рисунок 4.12. Загальний вигляд чарункового басейну.

Стінки басейну та внутрішні перегородки виконувалися із багатошарової дощатоклеєної фанери, товщина якої для зовнішніх стінок – 20 мм, для внутрішніх перегородок – 16 мм. Зовнішні стінки басейну опиралися на випробовуваний каркас, а внутрішні перегородки жорстко прикріплювалися до зовнішніх стінок за допомогою саморізів та клею. Між внутрішніми перегородками басейну та оболонкою встановлювався зазор 5 мм (рис. 4.13), тим самим забезпечуючи розподілення власної ваги басейну виключно на поверхню оболонки.

Рисунок 4.13. Установлений проміжок між внутрішніми перегородками басейну та сферичною оболонкою

У кожну із утворених чарунок улаштовувалися спеціально виготовлені поліетиленові футляри, що в цілому забезпечувало герметичність басейну, виконуючи роль гідрофобної плівки (рис. 4.14-4.23).

Навантаження виконувалося за чотирма схемами, аналогічними теоретичним дослідженням оболонки.

Рисунок 4.14. Корегування рівня води у чарунках

Рисунок 4.15. Заповнення чарунок водою

Рисунок 4.16. Корегування рівня води у чарунках

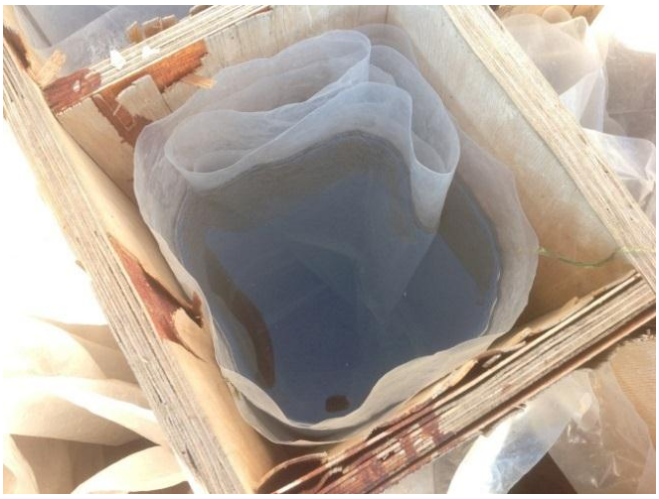


Рисунок 4.17. Чарунка, заповнена водою

Рисунок.4.18. Чарунки, заповнені водою

Рисунок 4.19. Чарунки, заповнені водою

Рисунок 4.20. Система подачі води у циліндричну оболонку

Рисунок 4.21. Установленні кріплення верхнього поясу басейну під час проведення експериментальних досліджень

Риснок 4.22 . Загальний вигляд

Рисунок.4.23. Насос для видалення води з комірок

4.4 Система вимірювання.

Для визначення якісного та кількісного характеру деформування дослідження сферичної оболонки виконувалися заміри вертикальної складової переміщень оболонки у 25 точках (рис. 4.24.).

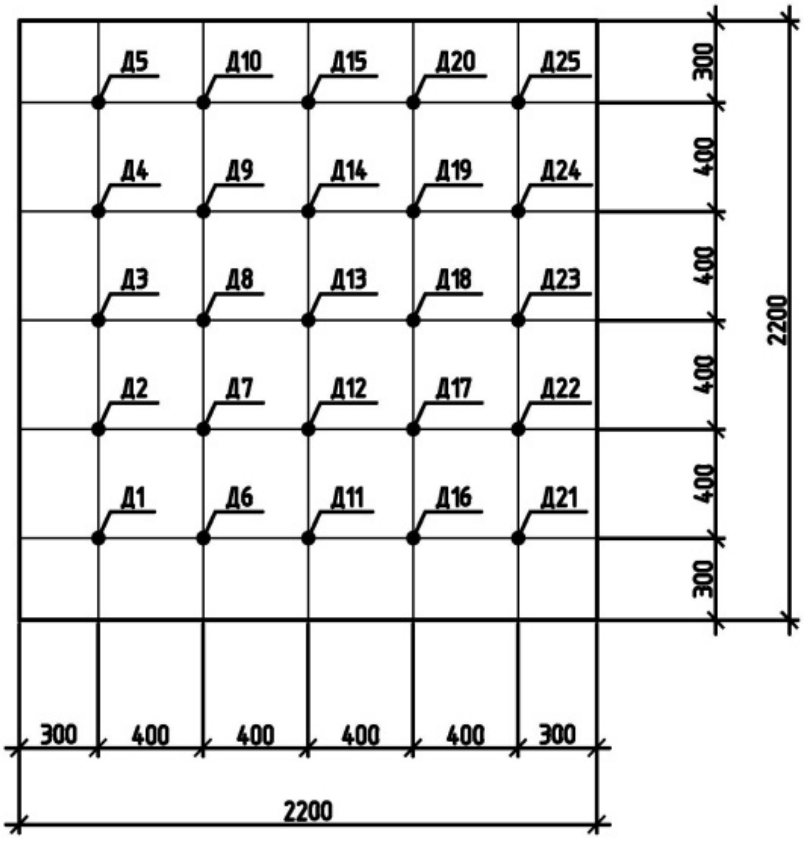


Рисунок 4.24. Схема розстановки індикаторів на сферичній оболонці

Для визначення переміщень циліндричної оболонки виміри здійснювалися також у 25-ти точках. При цьому, з огляду на складність конфігурації конструкції, що в свою чергу зумовило появу як вертикальних, так і горизонтальних переміщень досліджуваної поверхні оболонки під дією вертикального навантаження, виникла необхідність вимірювання переміщень в двох напрямках (рис. 4.25). Також, з огляду на значну жорсткість оболонки в експерименті використовувалися індикатори годинникового типу з ціною поділки 2 мк і ходом штока 2 мм (рис.4.26, 4.27). Індикатори кріпилися в зазначених точках за допомогою спеціально виготовлених каркасів, виконаних з квадратної труби 40х3 і металевого прута 10х10 мм (рис.4.28), які, в свою

чергу, за допомогою зварювання кріпилися до основного експериментального каркасу. Закріплення індикаторів зображене на рис.4.29.

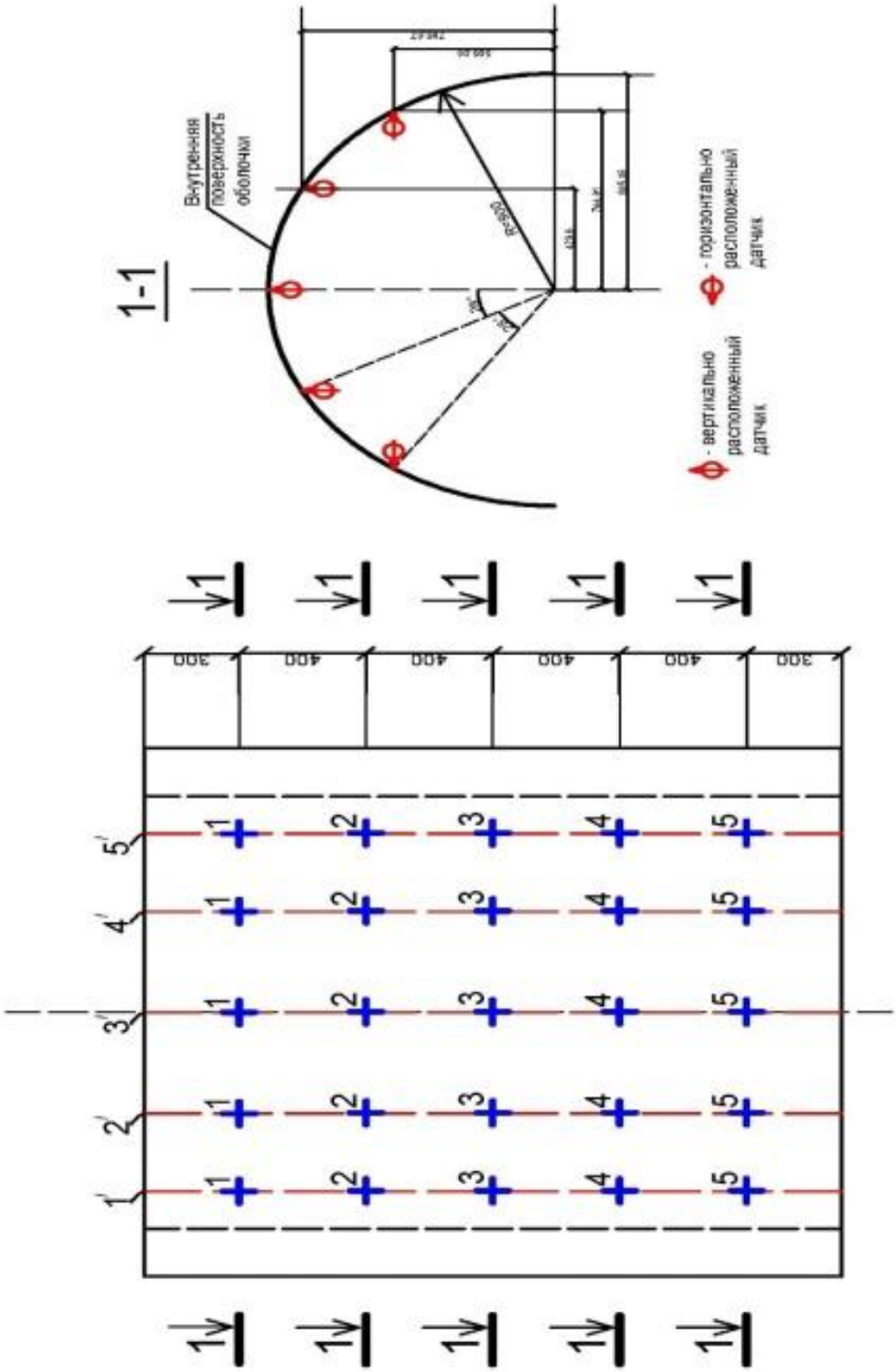


Рисунок 4.25. Схема розстановки індикаторів на циліндричній оболонці

Рисунок 4.26. Індикатори годинникового типу

Рисунок 4.27. Індикатори годинникового типу

Рисунок 4.28. Конструкція для закріплення

Рисунок 4.29. Закріплення індикаторів

Споруджена система вимірювання переміщень циліндричної оболонки зображена на рис.4.30

Рисунок 4.30. Система вимірювання-каркас кріплення приладів.

Посідовність експерименту. У процесі проведення експерименту навантаження анізотропних оболонок представляло собою рівномірно-розподілене навантаження на всій поверхні оболонок, ½ та 1/3 циліндричної оболонки і ½, ¼ і 1/8 на сферичної оболонці [72, 73, 74].

Випробування проводилися при температурі повітря 20-23^{0}С, при відносній вологості 60%. Випробування носили неруйнівний характер.

Перед початком проведення вимірювань деформацій випробовувані конструкції були повністю завантаженні рівномірно-розподіленним навантаженням 1 т/м^2 впродовж доби для ліквідації усадочних деформацій фундаменту стенду.

В процесі експерименту виконувалися виміри прогинів в 25 точках. Випробування проводилися послідовно, для отримання статистичних даних кожна схема навантаження / розвантаження виконувалася 6 разів.

Таким чином, система навантаження, система вимірювання, розроблений і запатентований спосіб випробувань плит і оболонок різної гаусом кривизни в комплексі дозволили вирішити в процесі випробувань наступні завдання:

- підтвердити отримані теоретичні дані експериментальним шляхом.
- оцінити деформований стан залізобетонних анізотропних оболонок.

Визначення фізичних параметрів бетону конструкції. З огляду на той факт, що досліджувана оболонка виготовлена методом мокрого торкретування, виникла необхідність уточнення фізичних параметрів бетону конструкції. У зв'язку зі сказаним на базі лабораторії кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, було проведено випробування 4-х бетонних призм, які були відібрані в момент виробництва оболонки. Метою даного випробування було визначення фактичного модуля пружності (*Eck*) і призменного значення межі міцності на стиск (*fck*) бетону оболонки. Випробування проводилися відповідно до методології, викладеної в ДСТУ Б.В.2.7 – 217:2009 [75, 76].

Призмову міцність $f_{c.prism}$ обчислювали для кожного зразка за формулою

$$f_{c,prism} = \frac{Nu}{A},$$

де N_u – руйнівне навантаження, виміряне за шкалою силовимірювача преса(машини);

A – середнє значення площі поперечного перерізу зразка, визначене по його лінійних розмірах

Модуль пружності E_{cm} обчислювали для кожного зразка при рівні навантаження, що становить 30% від руйнівного, за формулою

$$E_{cm} = \frac{\sigma 1}{\varepsilon 1el},$$

де $\sigma_1 = N_1 / A$ збільшення напружень від умовного нуля до рівня зовнішнього навантаження, яке дорівнює (30 ± 5)% від руйнівного;

N_1 – відповідне збільшення зовнішнього навантаження до рівня (30 ± 5)% від руйнівного N_u;

$\varepsilon_{1\,el}$ – збільшення пружно-миттєвої відносної поздовжньої деформації зразка, що відповідає рівню навантаження N_1 і виміряне на початку кожного ступеня його прикладання.

Коефіцієнт Пауссона бетону обчислювали для кожного зразка при рівні навантаження, що становить (30 ± 5)% від руйнівного за формулою;

$$\nu = -\frac{\varepsilon 2\,el}{\varepsilon 1\,el},$$

де ε_{2el} – збільшення пружно-миттєвої відносної поперечної деформації зразка, що відповідає рівню навантаження N_1 і виміряне на початку кожного ступеня його прикладання.

Значення $\varepsilon_{1\,el}$ і $\varepsilon_{2\,el}$ визначали за формулами:

$$\varepsilon_{1\,el} = \varepsilon_{1} - \Sigma\varepsilon_{1c1};$$

$$\varepsilon_{2el} = \varepsilon_{2} - \Sigma\varepsilon_{2c1};$$

де ε_1 і ε_2 – збільшення повних відносних поздовжніх і поперечних деформацій зразка , що відповідають рівню навантаження N_1 і виміряні наприкінці ступеня його прикладання;

$\Sigma\varepsilon_{1c1}$ і $\Sigma\varepsilon_{2c1}$ - збільшення відносних поздовжніх і поперечних деформацій швидкоплитної повзучості, отримані при витримках навантаження до рівня навантаження N_1.

Збільшення відносних поздовжніх і поперечних деформацій обчислюють як середнє арифметичне показань приладів по чотирьох гранях призми/

Відносні деформації визначали за формулами:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l1}{l1}; \qquad \varepsilon_2 = \frac{\Delta l2}{l2};$$

де Δl_1, Δl_2 – абсолютні збільшення поздовжньої і поперечної деформацій зразка. викликані відповідним збільшенням напружень;

l_1, l_2 - фіксовані бази вимірювання поздовжньої й поперечної деформації зразка

Загальний вигляд призматичних зразків, та випробувальної установки наведено на рис.4.31, 4.32.

Рисунок 4.31. Загальний вигляд зразків

Рисунок 4.32. Зразок в процесі випробування.

На підставі усереднених даних, отриманих в ході випробування зразків, побудована діаграма «σ-ε» бетону оболонок (рис.4.33), з якої отримані необхідні характеристики матеріалу (E_{ck} = 16,5 МПа; f_{ck} = 13МПа).

В результаті проведених досліджень отримано модуль пружності чисельно рівний 16 МПа. Арматура для залізобетонних оболонок приймалася конструктивно згідно технічних характеристик, описаних в ДСТУ 3760:2006 (ISO 6935-2:1991, NEQ) [77]. Класс арматурного прокату А 400С, та конструктивна В500 згідно ДСТУ EN 10080:2009 [78].

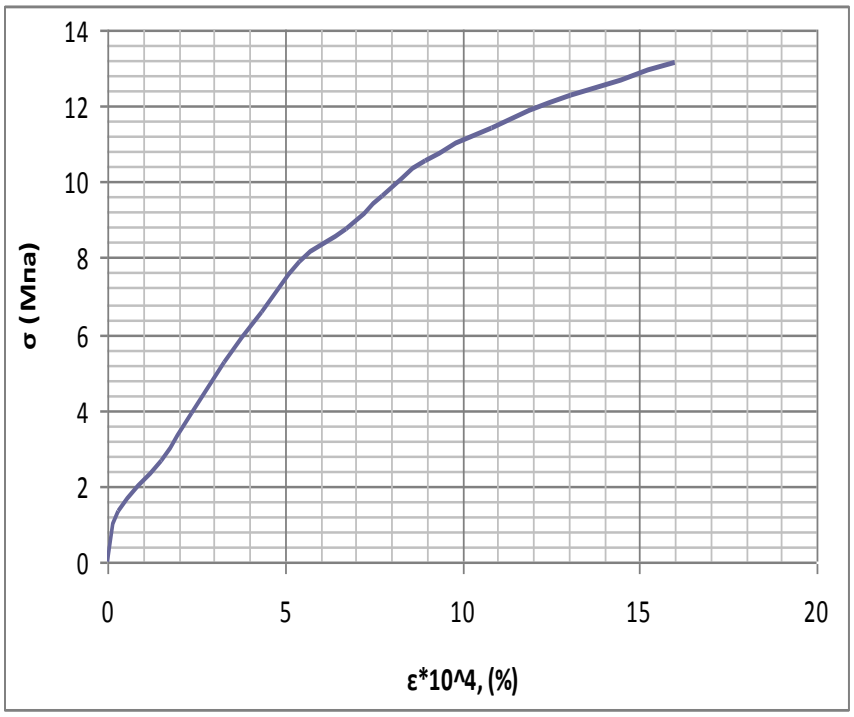


Рисунок 4.33. Діаграма «напруга - деформація» для бетона оболонок, які виготовлені методом «мокрого» торкретування залізобетону.

Аналіз результатів. Аналіз отриманих результатів виконано шляхом зіставлення теоретичних і експериментальних полів даних. Результати аналізу експериментальних досліджень вертикальних переміщень циліндричної оболонки при повному навантаженні, 1/2 і 1/3 частини поверхні наочно зображений на рис.4.34-4.36. Графічне зображення вертикальних переміщень сферичної оболонки від рівномірно розподіленого навантаження 10 кН / м^2 по всій поверхні конструкції, 1/2часті, 1/4часті і 1/8 частини поверхні конструкції наочно проілюстровано на рис.4.37 - 4.40.

4.5 Зіставлення теоретичних і експериментальних досліджень.

Зіставлення отриманих експериментальних даних (табл. 4.1, 4.2) з теоретичними наглядно демонструє коректність розрахункової моделі сферичної оболонки та циліндричної оболонки, а також чистоту проведеного експерименту (табл. 4.3., 4.4.).

Таблиця 4.1

Усереднені дані індикаторів вертикальних переміщень сферичної оболонки

№ індикатора	Вертикальні переміщення, мм							
	повне	Δ	1/2 поверх-ні	Δ	1/4 поверхні	Δ	1/8 поверхні	Δ
1	0,275	0,021	0,117	0,004	0,044	0,026	0,016	0,006
2	0,382	0,009	0,136	0,000	0,055	0,024	0,023	0,006
3	0,419	0,082	0,153	0,021	0,068	0,013	0,027	0,007
4	0,377	0,013	0,133	0,003	0,051	0,003	0,020	0,009
5	0,264	0,030	0,115	0,006	0,039	0,031	0,015	0,007
6	0,383	0,008	0,157	0,023	0,142	-0,021	0,042	0,001
7	0,597	-0,021	0,195	0,004	0,149	-0,018	0,054	0,000
8	0,496	0,026	0,197	0,011	0,159	-0,003	0,063	-0,004
9	0,590	-0,014	0,185	0,014	0,093	0,003	0,049	0,005
10	0,387	0,004	0,153	0,027	0,050	0,004	0,039	0,003

Продовження табл.4.1.

11	0,417	0,084	0,231	0,020	0,208	0,014	0,077	-0,009
12	0,490	0,031	0,257	0,031	0,231	-0,014	0,091	0,000
13	0,686	-0,054	0,281	0,022	0,178	-0,026	0,096	-0,001
14	0,495	0,026	0,265	0,023	0,156	-0,005	0,095	-0,004
15	0,420	0,081	0,241	0,010	0,064	0,019	0,080	-0,012
16	0,384	0,007	0,295	0,005	0,233	-0,016	0,108	-0,016
17	0,595	-0,019	0,331	-0,010	0,237	0,011	0,130	-0,008
18	0,498	0,021	0,349	0,012	0,227	-0,018	0,184	-0,015
19	0,593	-0,017	0,335	-0,006	0,151	-0,020	0,127	-0,005
20	0,381	0,010	0,308	-0,008	0,059	0,020	0,103	-0,012
21	0,268	0,026	0,238	-0,039	0,178	0,021	0,120	-0,017
22	0,386	0,004	0,349	-0,008	0,236	-0,013	0,138	-0,011
23	0,413	0,088	0,405	-0,007	0,211	0,011	0,223	0,003
24	0,380	0,010	0,358	-0,017	0,144	-0,023	0,135	-0,008
25	0,275	0,021	0,246	-0,047	0,047	0,019	0,118	-0,015

Таблиця 4.2

Усереднені показники індикаторів переміщень циліндричної оболонки

№ індикатора	Вертикальні переміщення, мм					
	повна	Δ	1/2 поверхні	Δ	1/3 поверхні	Δ
1'1	0.041	-0.007	0.101	0.007	0.021	0.004
1'2	0.138	-0.006	0.116	-0.005	0.083	-0.007
1'3	0.228	-0.01	0.099	-0.003	0.077	-0.006
1'4	0.138	-0.006	0.033	-0.008	0.037	-0.001
1'5	0.041	-0.007	0.061	0.006	0.058	0
2'1	0.012	-0.004	0.114	0.006	0.097	0.005
2'2	0.194	-0.007	0.137	-0.009	0.119	-0.006
2'3	0.237	-0.004	0.093	-0.011	0.087	-0.005
2'4	0.194	-0.007	0.021	0	0.043	0
2'5	0.012	-0.004	0.088	0.005	0.064	0.005
3'1	0	-0.003	0.124	0.007	0.134	0.007

Продовження. табл.4.2.

3'2	0.217	-0.004	0.142	-0.009	0.157	-0.008
3'3	0.242	-0.013	0.093	-0.01	0.075	0.004
3'4	0.217	-0.004	0.012	-0.004	0.043	-0.002
3'5	0	-0.003	0.98	-0.014	0.82	0.729
4'1	0.012	-0.004	0.114	0.006	0.097	0.005
4'2	0.194	-0.007	0.137	-0.009	0.119	-0.006
4'3	0.237	-0.004	0.093	-0.011	0.087	-0.005
4'4	0.194	-0.007	0.021	0	0.043	0
4'5	0.012	-0.004	0.088	0.005	0.064	0.005
5'1	0.041	-0.007	0.101	0.007	0.021	0.004
5'2	0.138	-0.006	0.116	-0.005	0.083	-0.007
5'3	0.228	-0.01	0.099	-0.003	0.077	-0.006
5'4	0.138	-0.006	0.033	-0.008	0.037	-0.001
5'5	0.041	-0.007	0.061	0.006	0.058	0

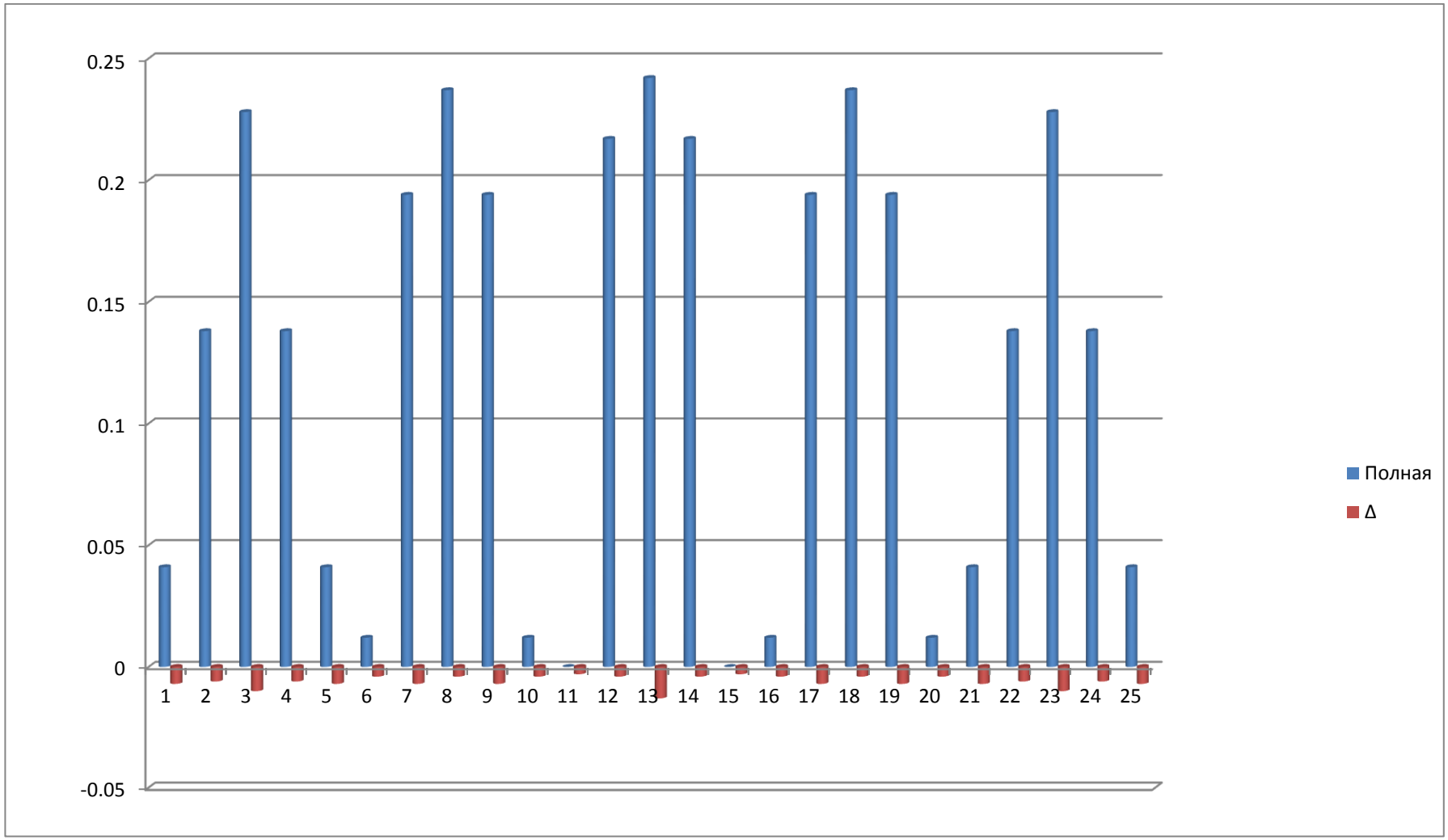


Рисунок 4.34. Графічне зображення вертикальних переміщень циліндричної оболонки від рівномірно розподіленого навантаження 10 кН / м^2 по всій поверхні конструкції

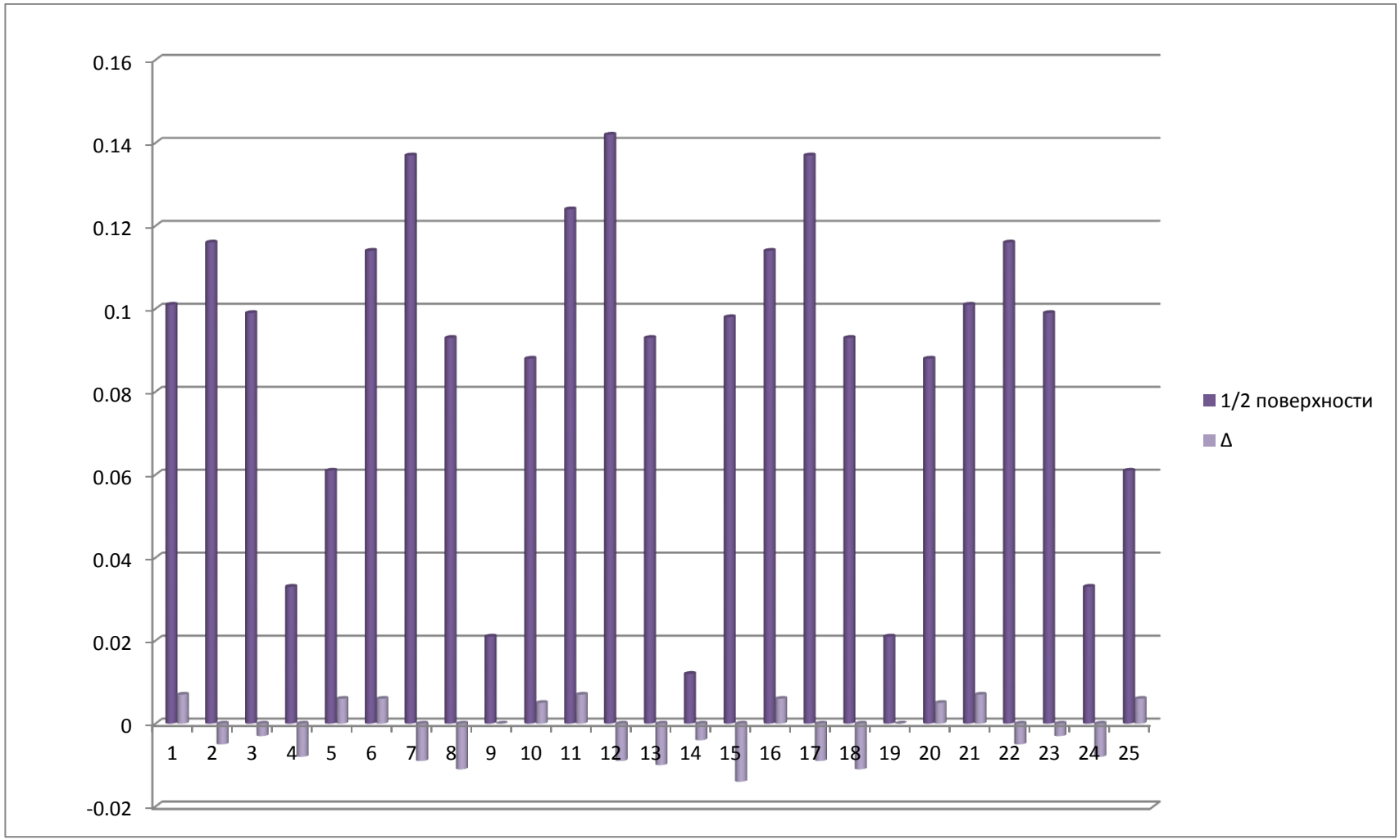


Рисунок 4.35. Графічне зображення вертикальних переміщень циліндричної оболонки від рівномірно розподіленого навантаженням 10 кН / м^2 по 1/2 поверхні конструкції

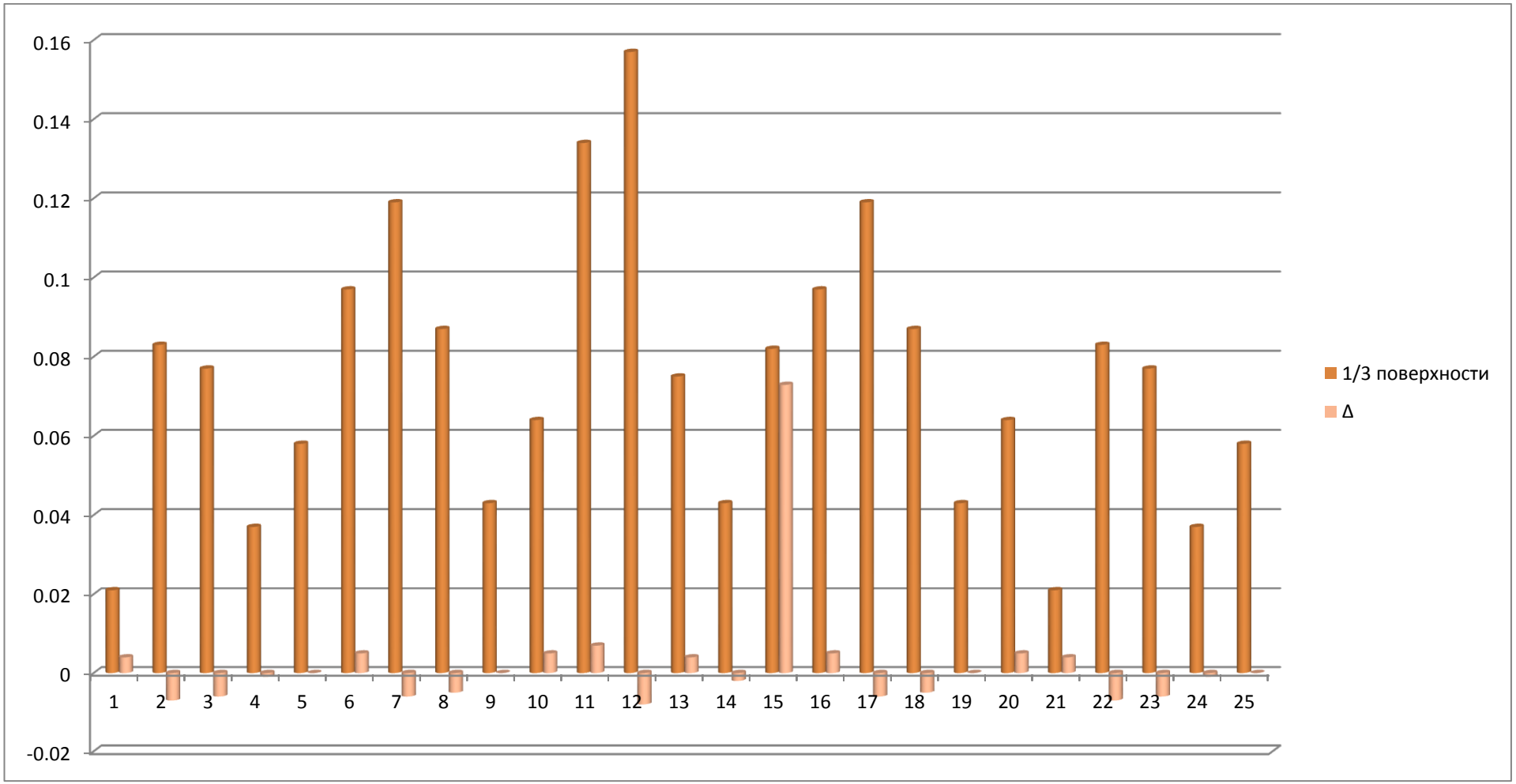


Рисунок 4.36. Графічне зображення вертикальних переміщень циліндричної оболонки від рівномірно розподіленого навантаженням 10кН / м^2 по 1/3 поверхні конструкції

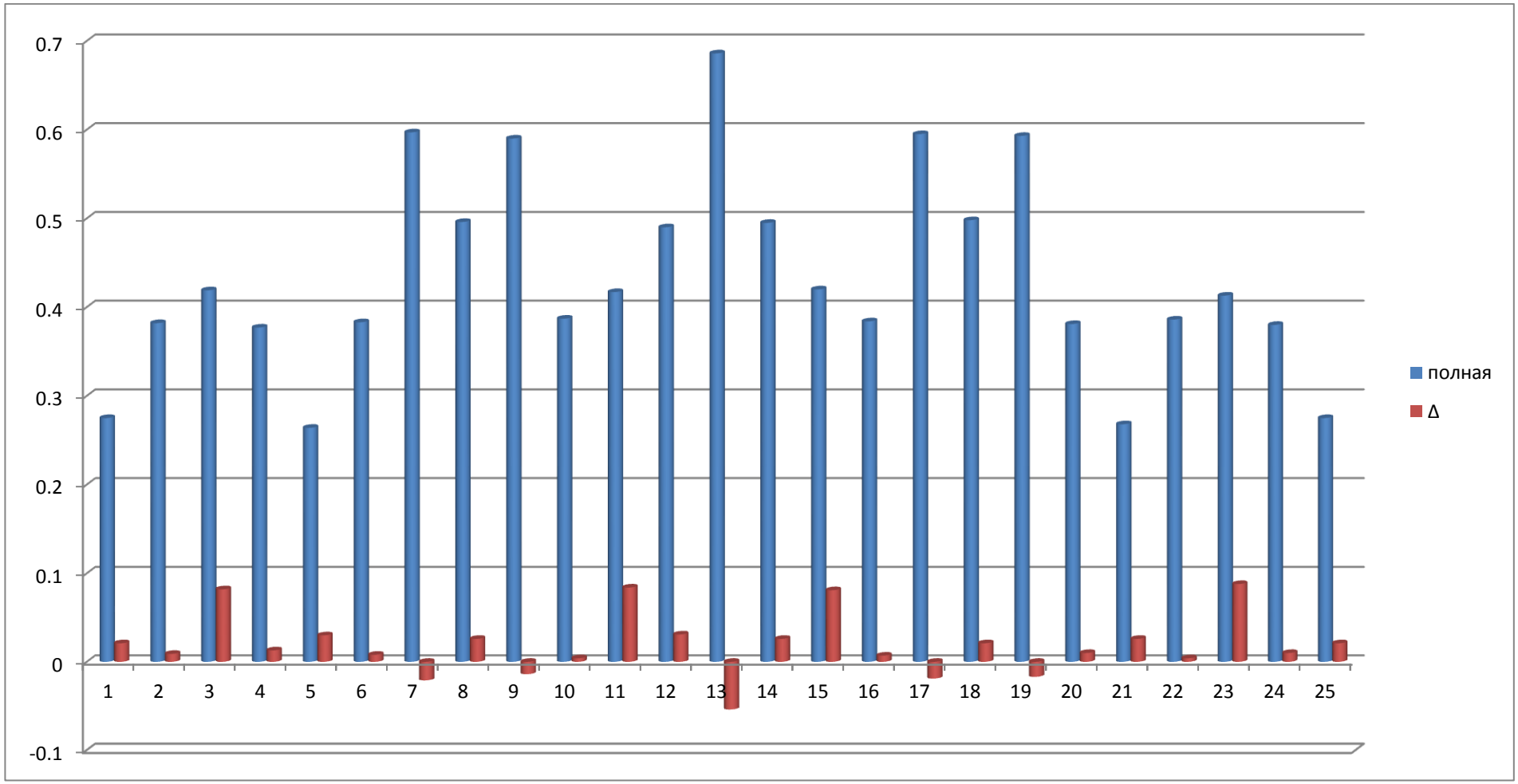


Рисунок 4.37. Графічне зображення вертикальних переміщень сферичної оболонки від рівномірно розподіленого навантаження 10 кН / м^2 по всій поверхні конструкції.

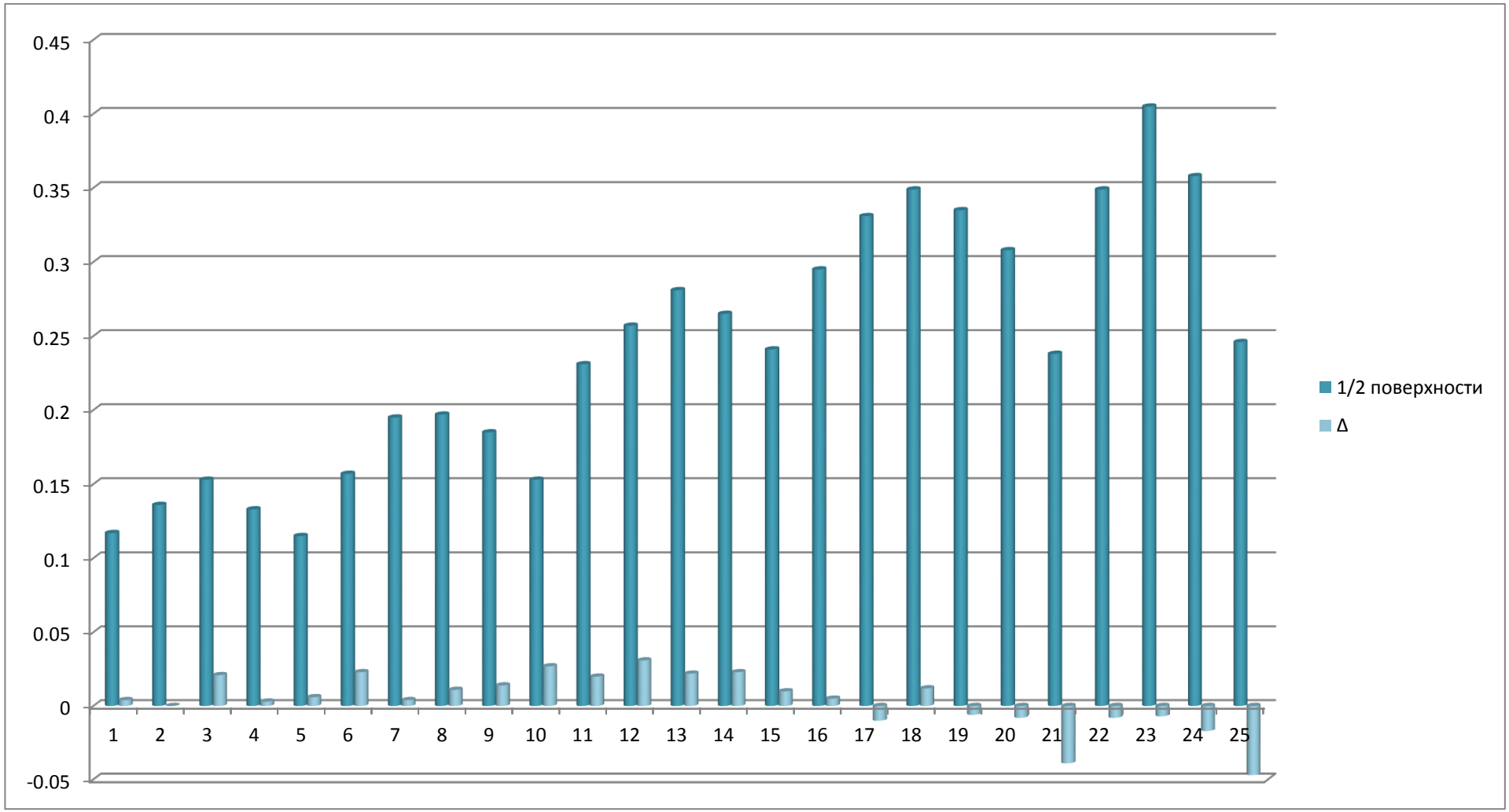


Рисунок 4.38.Графічне зображення вертикальних переміщень сферичної оболонки від рівномірно розподіленого навантаження 10 кН / м^2 по 1/2 поверхні конструкції.

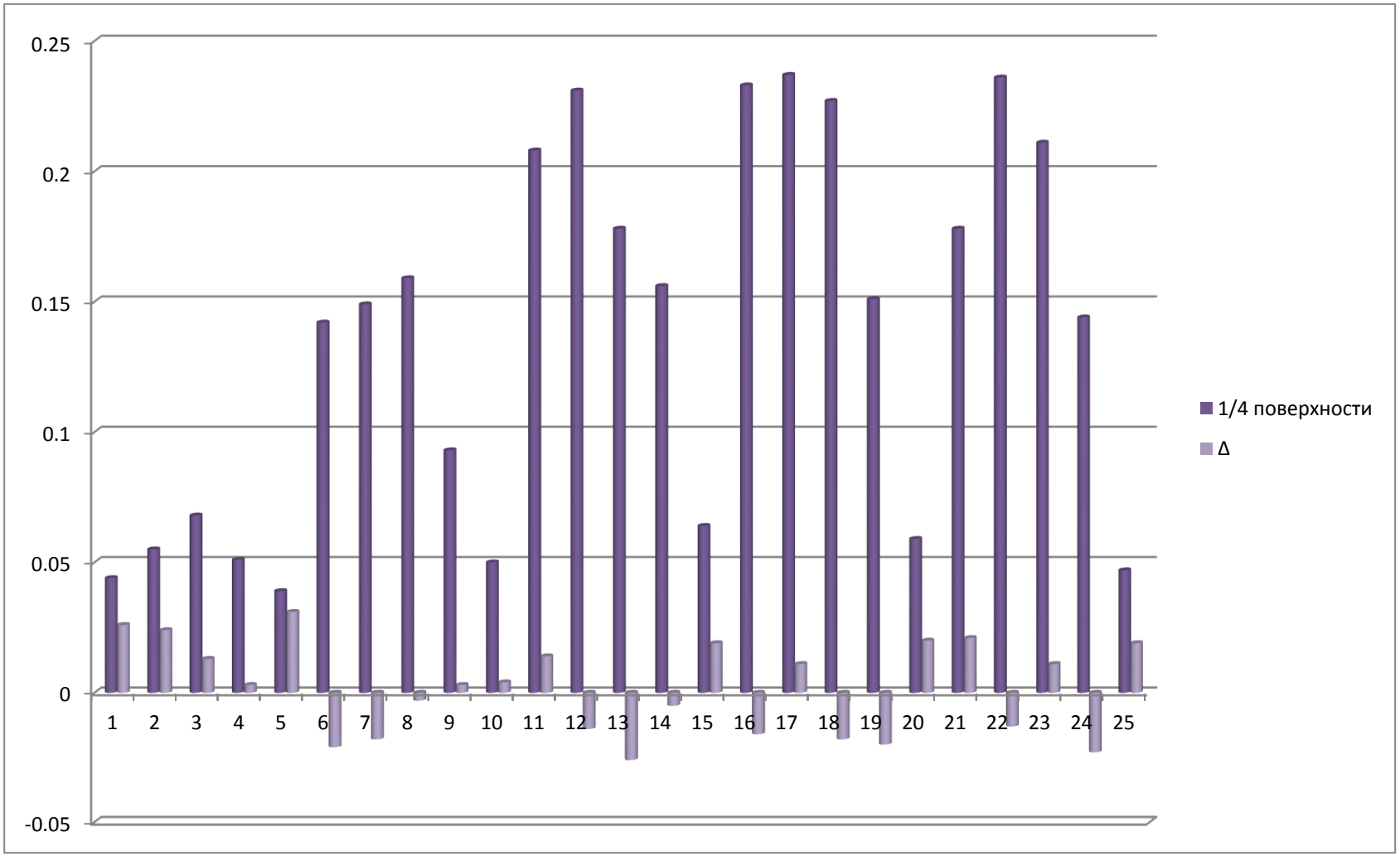


Рисунок 4.39 Графічне зображення вертикальних переміщень сферичної оболонки від рівномірно розподіленого навантаження 10 кН / м^2 по 1/4 поверхні конструкції.

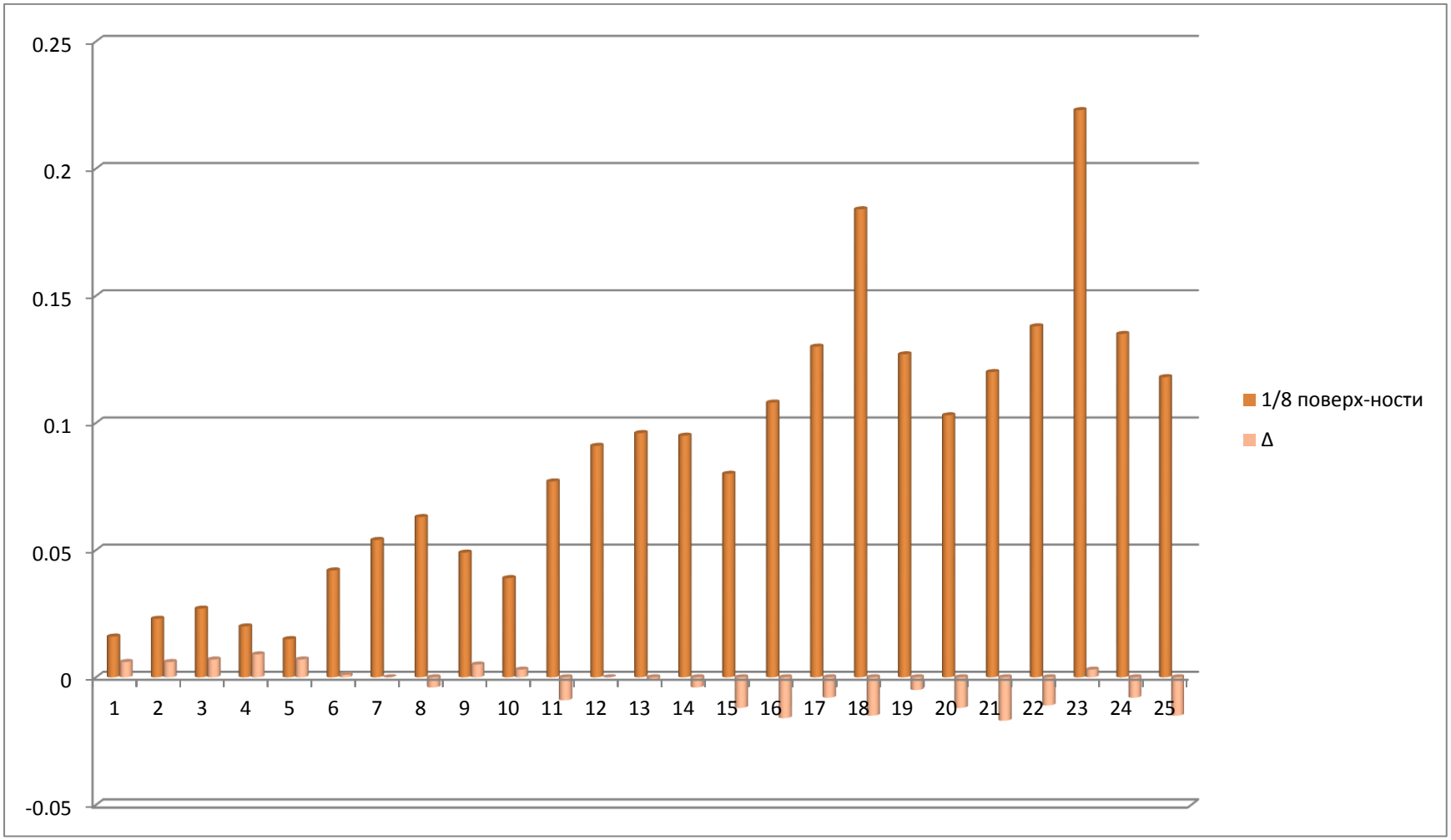
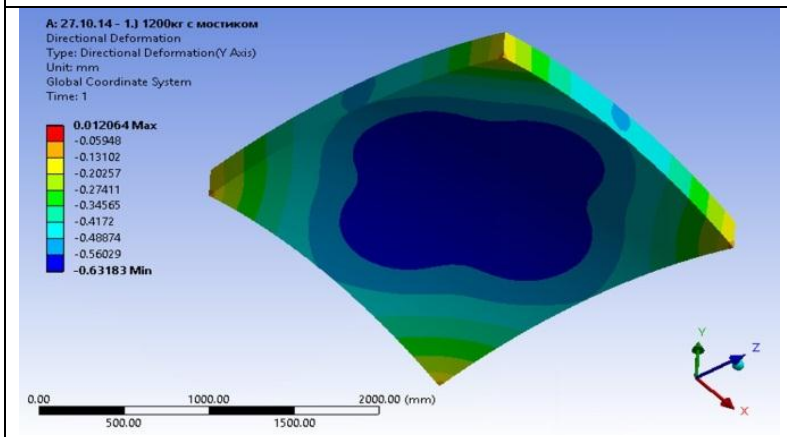
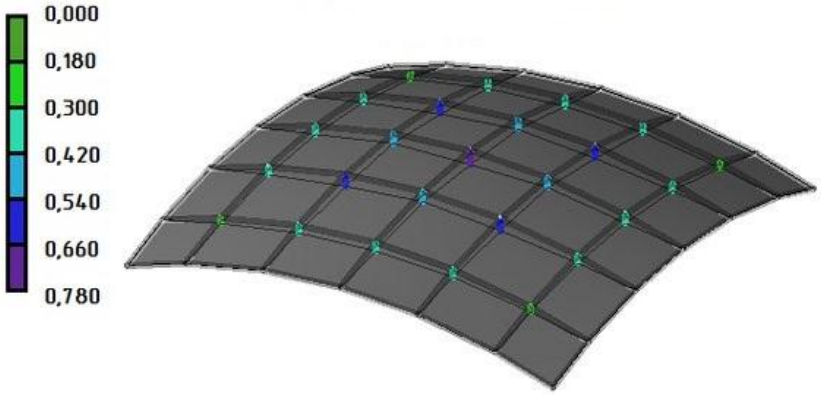
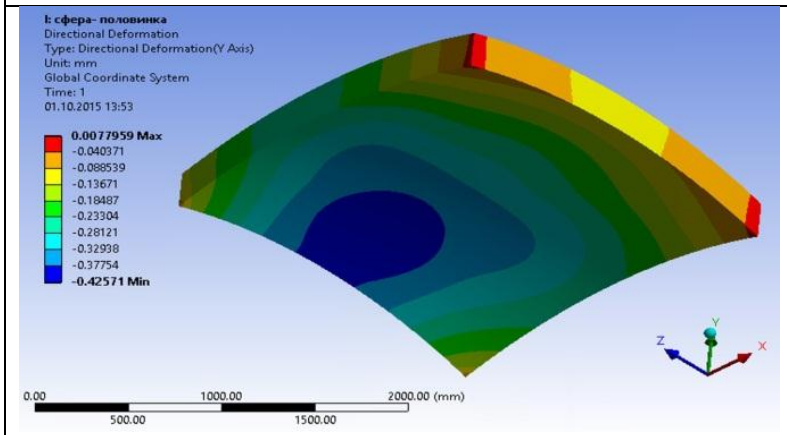
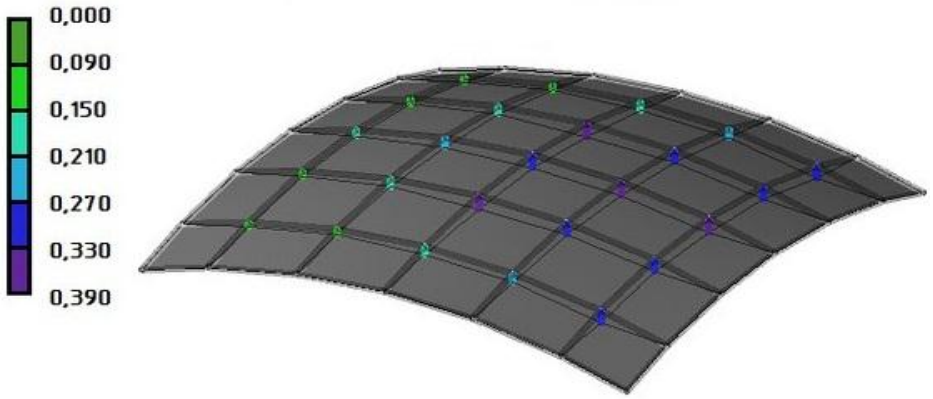


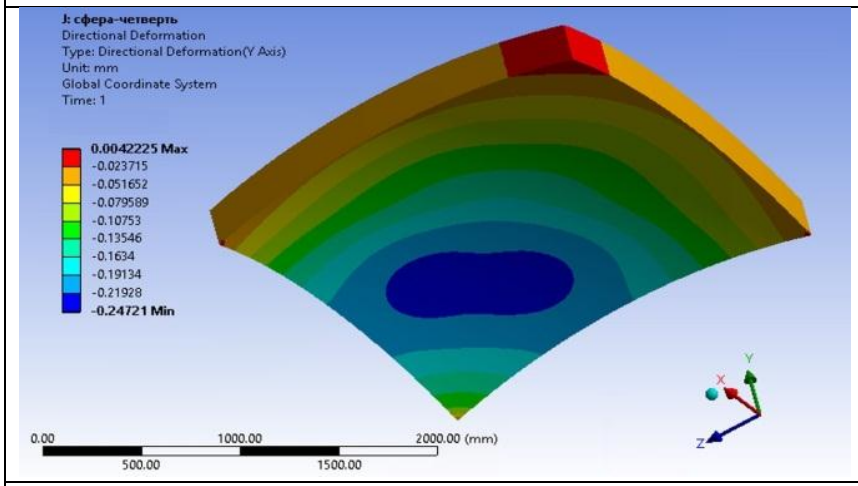
Рисунок 4.40. Графічне зображення вертикальних переміщень сферичної оболонки від рівномірно розподіленого навантаження 10 кН / м^2 по 1/8 поверхні конструкції.

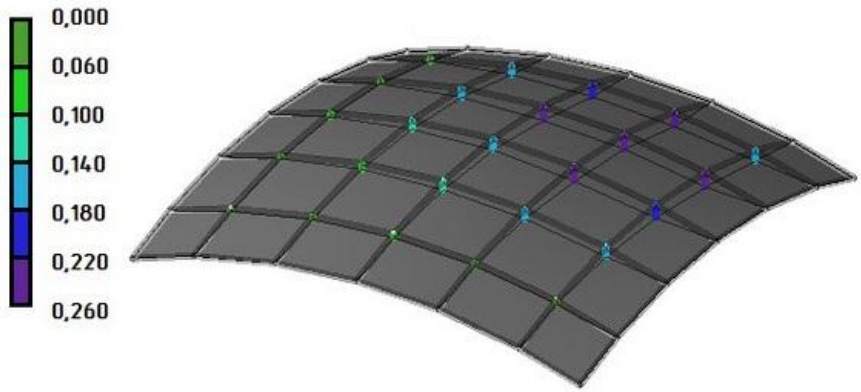
Таблиця 4.3

Зіставлення теоретичних і єксперементальных досліджень сферичної оболонки

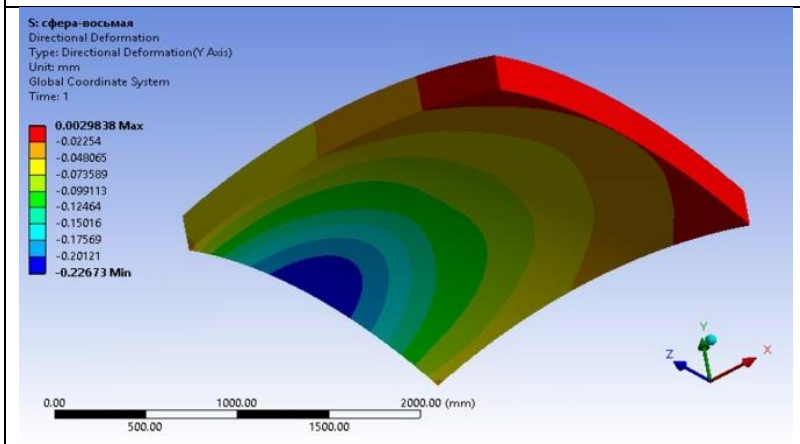
Теоретичне поле переміщень	Експериментальне поле переміщень
	
а) вся поверхня	
	
б)1/2 поверхні;	

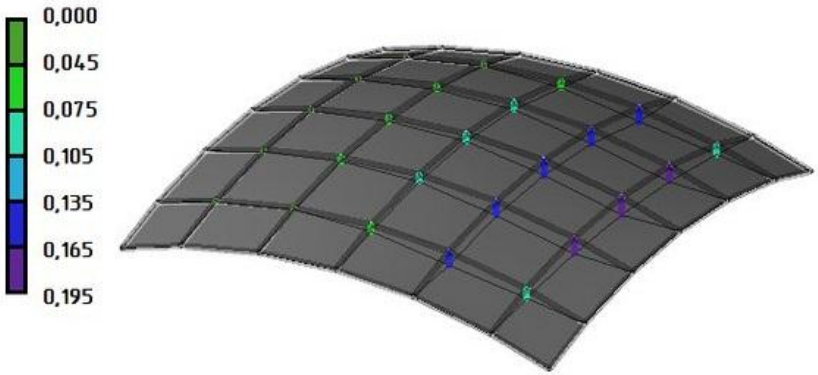
Продовження табл.4.3





в)) 1/4 поверхні

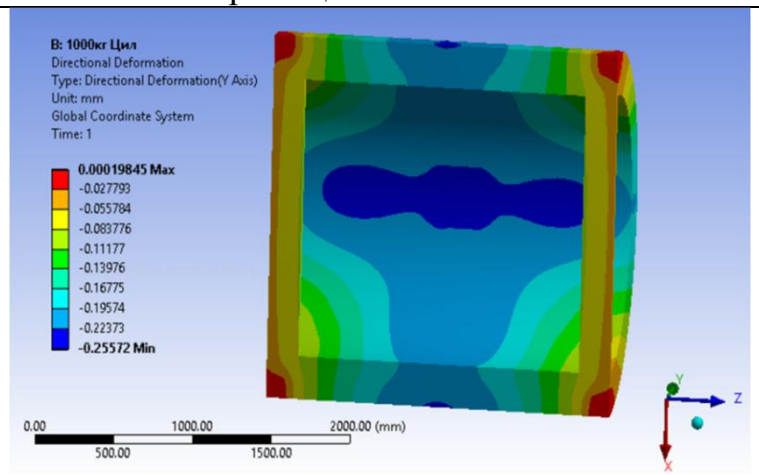
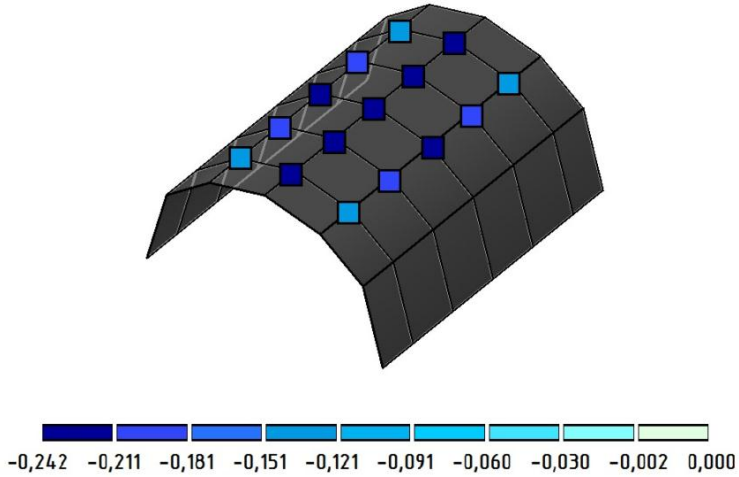
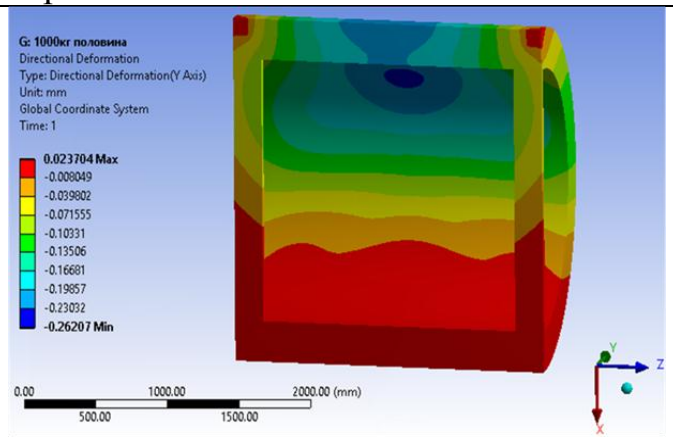
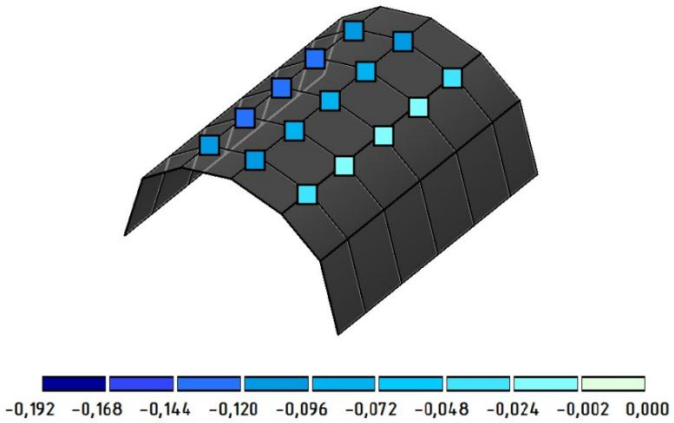




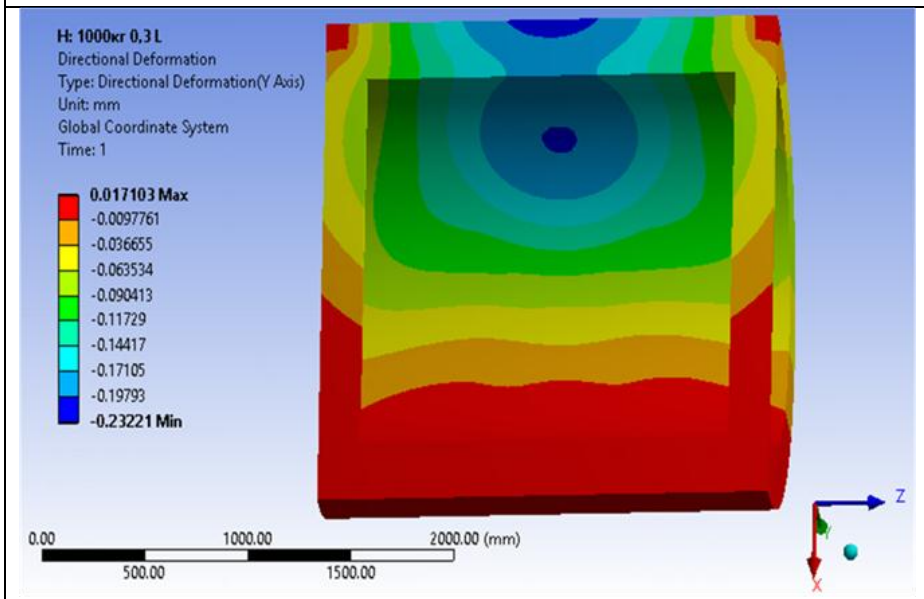
г) 1/8 поверхні.

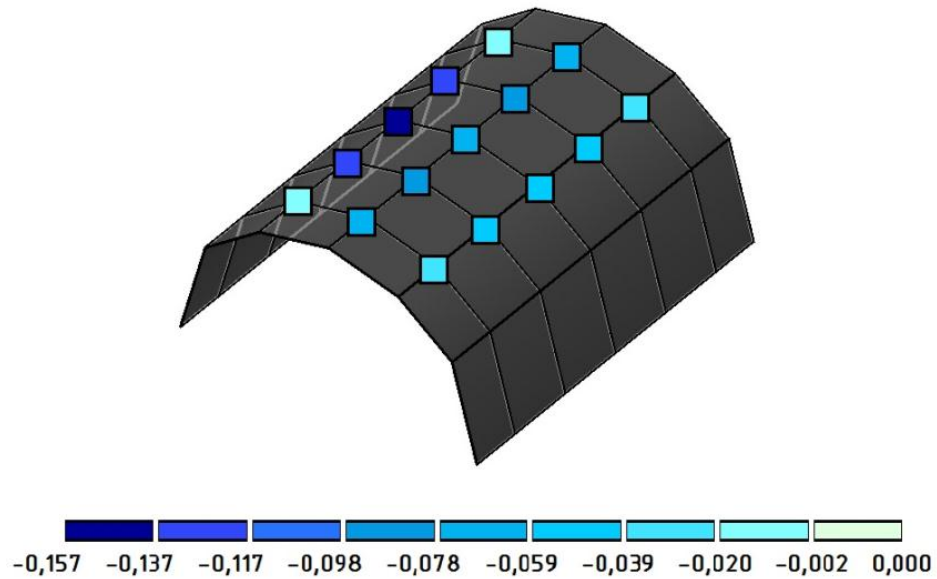
Таблиця 4.4.

Зіставлення теоретичних і єксперементальных досліджень циліндричної оболонки:

Теоретичне поле переміщень	Експериментальне поле переміщень
	
а) вся поверхня	
	
б)1/2 поверхні	

Продовження табл.4.4.





в)1/3 поверхні.

4.6. Оцінка несучої здатності конструктивно-анізотропних оболонок

Для криволінійних конструкцій приклади моделювання складені для двох сферичних оболонок різної кривизни, опертих по кутах квадратного плану. Для порівняльного аналізу розподілу компонентів НДС наведені поля приведених напружень, підраховані за критерієм Генієва, а також побудовані діаграми питомих ваг деформацій розтягування і стиснення для головних напружень σ_1, σ_2 і σ_3. Ця інформація дозволяє оцінити раціональність геометрії (в сенсі ізоенергетичності системи) оболонок, при цьому для обох складових елементів (обшивки, ребра).

При розрахунку і конструюванні просторових криволінійних конструкцій як правило використовуються програмні комплекси, фундовані методом скінченних елементів (МСЕ). СЕ модель конструкції складається з великого числа СЕ, так сфера на рис. 4.41 складається з 232337 СЕ, а сфера на рис. 4.47 – з 266828 СЕ. Крім того, при тріанґулюванні таких геометрично складних конструкцій практично неможливо уникнути появи вироджених СЕ, внаслідок чого можлива поява необґрунтованих з фізичної точки зору концентраторів напружень. При такій кількості СЕ вже не можливо орієнтуватися на максимальні або мінімальні значення напружень, тому що вони не будуть відображати фізичну сутність розглянутої конструкції.

Для проведення якісного та кількісного аналізу НДС таких конструкцій необхідно застосовувати різні (відповідні фізичній сутності розглянутої конструкції) теорії міцності. Наприклад, намагатися добитися ізоенергетичності конструкції (див. розділ 3) або, як показано на рис. 4.42 і 4.48, застосовувати для аналізу теорію Генієва. Також для кількісного аналізу зручно побудувати графіки розподілу напружень в різних діапазонах за СЕ і їх процентне співвідношення кількості потрапляння в кожен з діапазонів. На рис. 4.43 і 4.49 наведено розподіл кількості СЕ (у відсотковому співвідношенні) у різних діапазонах напружень за теорією Генієва. На рис 4.44 -4.46 і 4.50 -4.52 то ж для

головних напружень. З цих графіків можна побачити, що пікові значення на загальній картині ізополей напружень на рис. 4.42, 4.48 є приватним явищем і, після визначення та усунення причин утворення цих концентраторів напружень, можна враховувати при розрахунку вже значно менші рівні напружень.

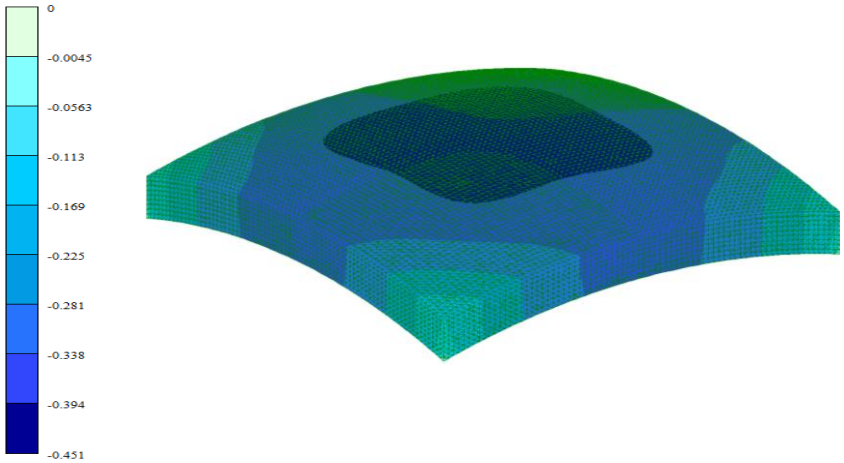


Рисунок 4.41. Переміщення по Z. Сфера з малим радіусом кривизни, мм

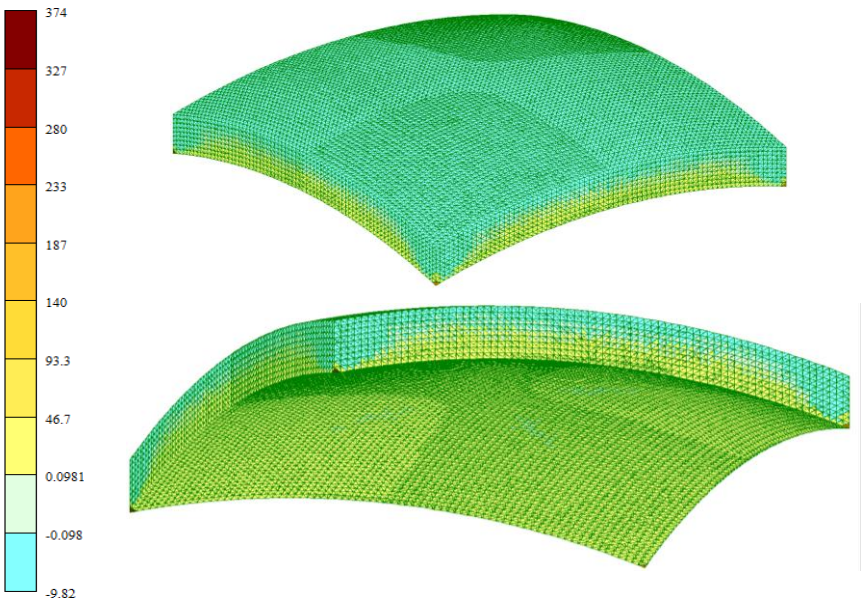


Рисунок 4.42. Напруження за теорією Генієва. Сфера з малим радіусом, МПа.

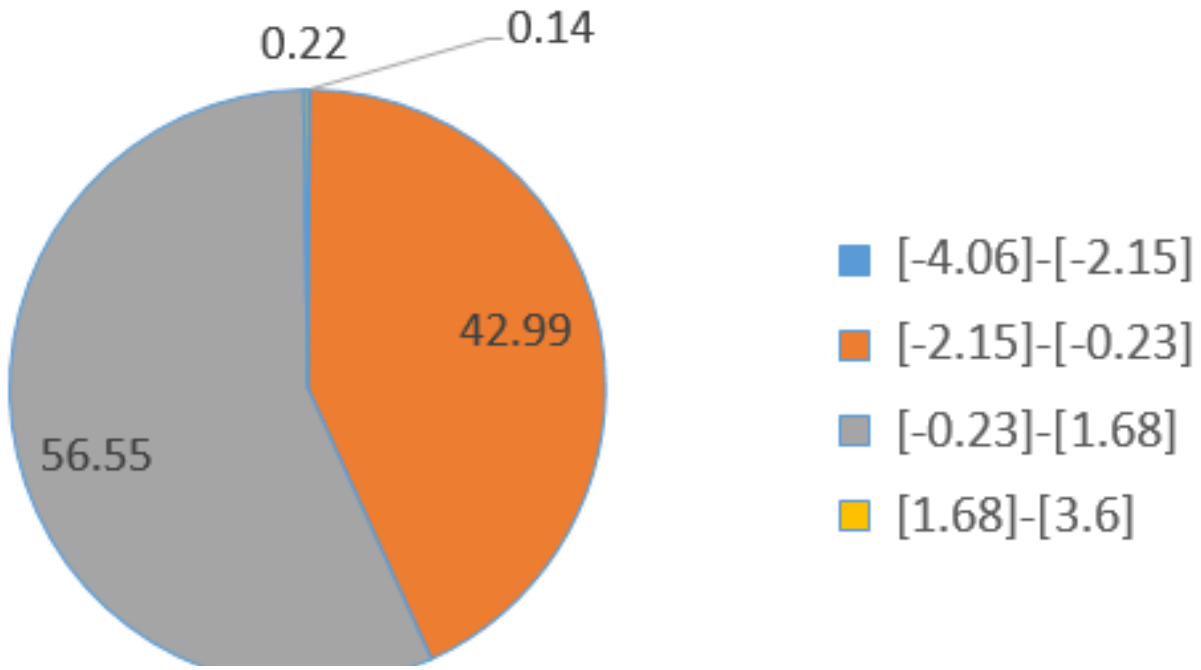


Рисунок 4.43. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від напружень за теорією Генієва (Rt=1.8 МПа, Rc=17 МПа).

Сфера з малим радіусом кривизни, МПа

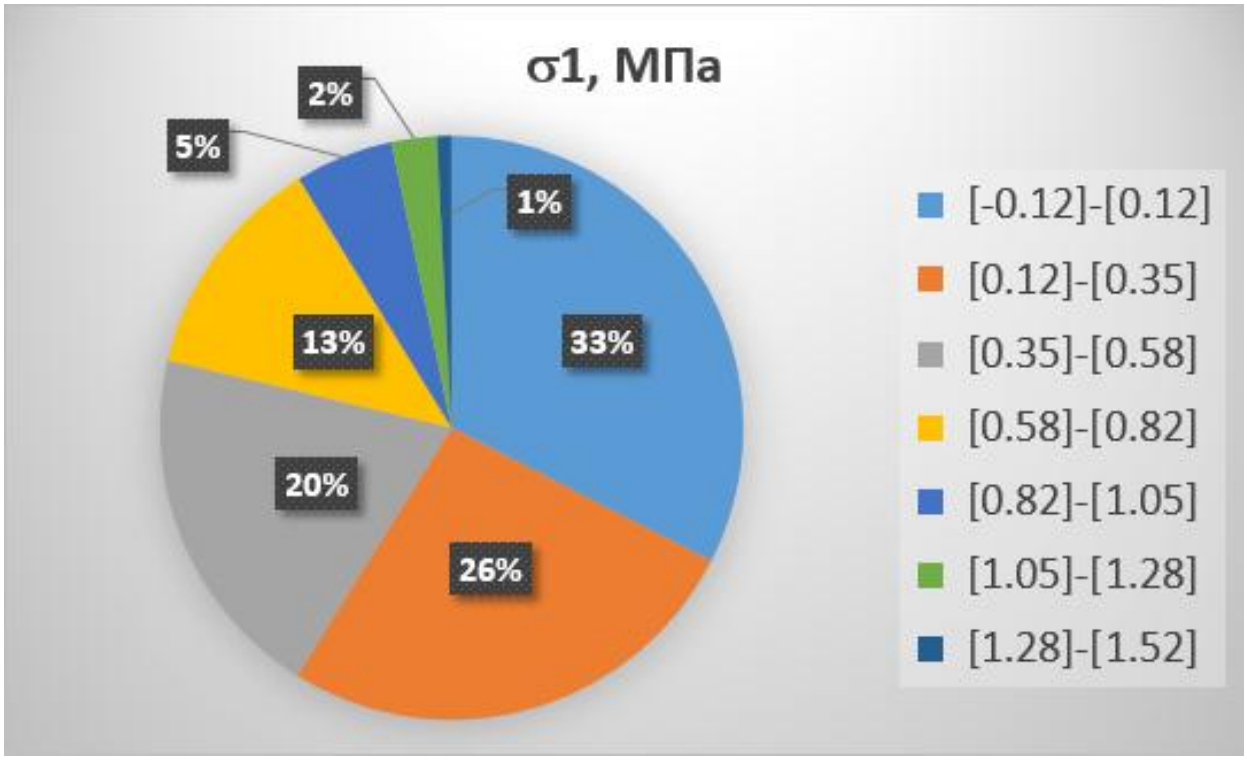


Рисунок 4.44. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від головних напружень σ1.

Сфера з малим радіусом кривизни, МПа

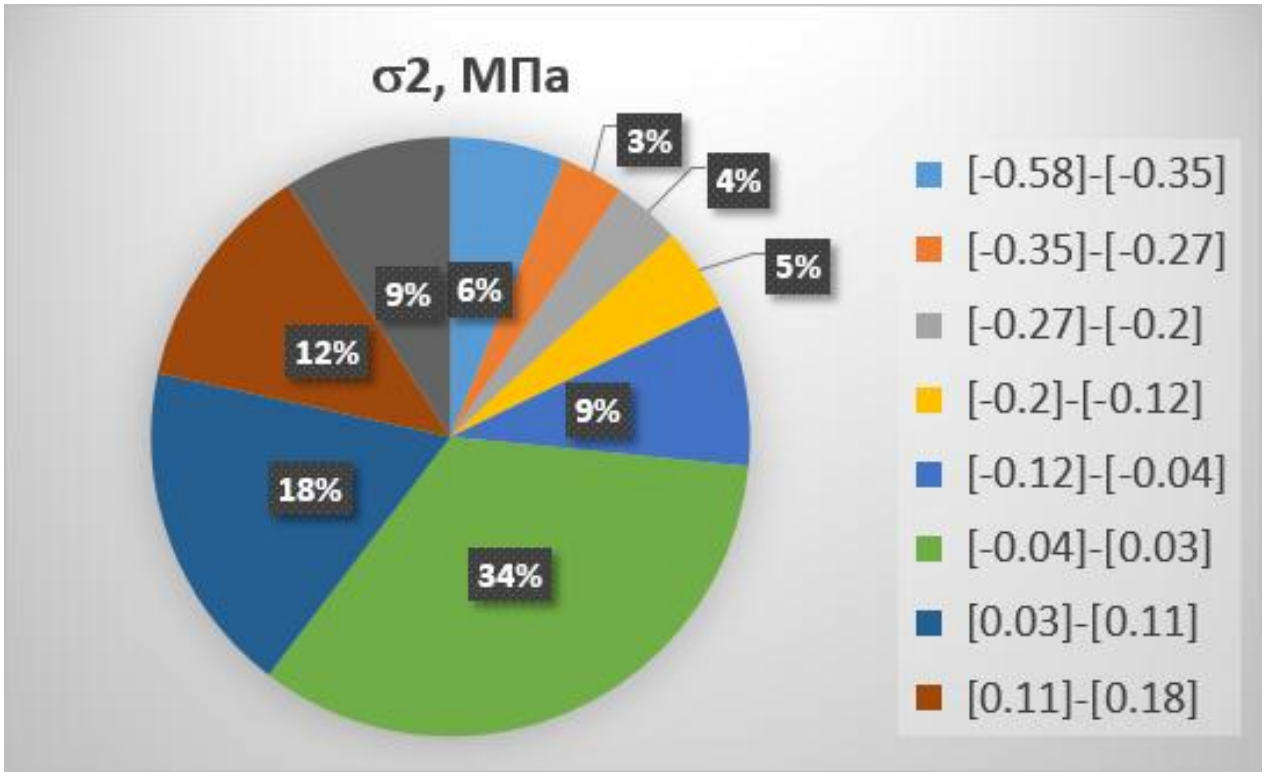


Рисунок 4.45. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від головних напружень σ2.

Сфера з малим радіусом кривизни, МПа

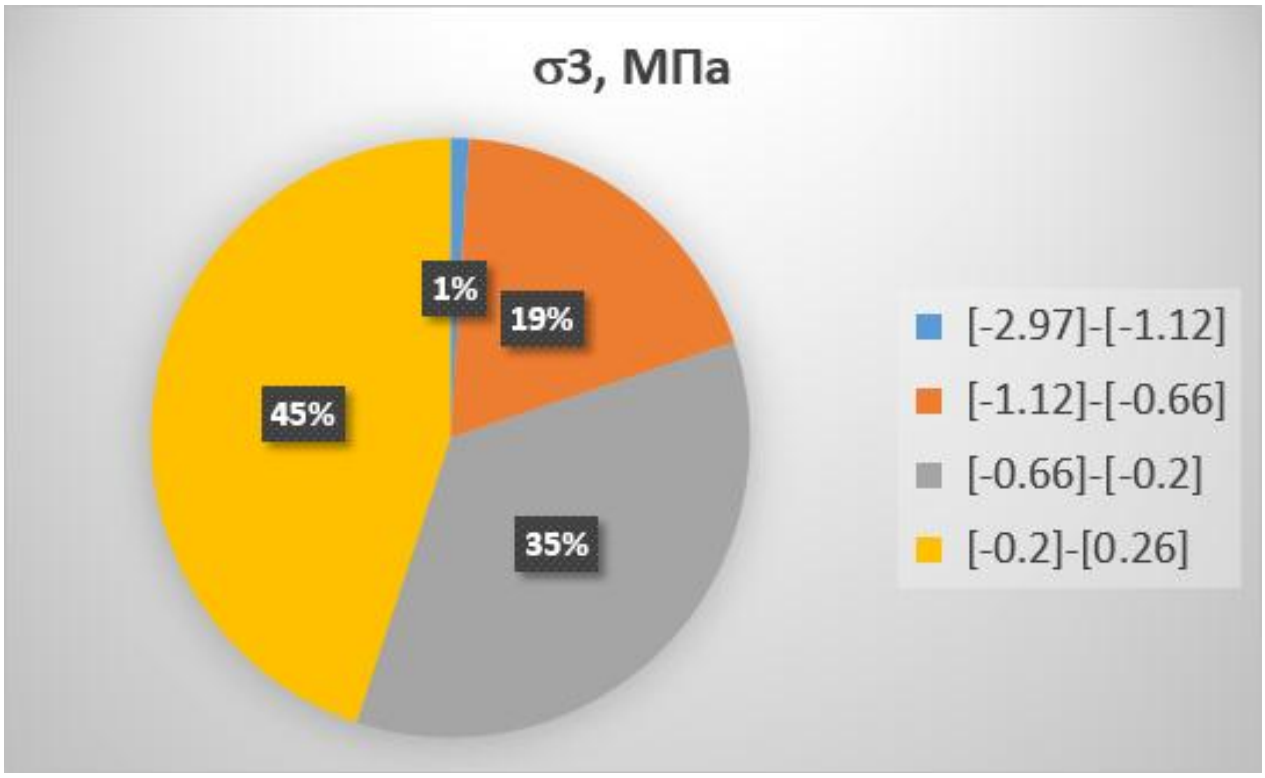


Рисунок 4.46. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від головних напружень σ3.

Сфера з малим радіусом кривизни, МПа

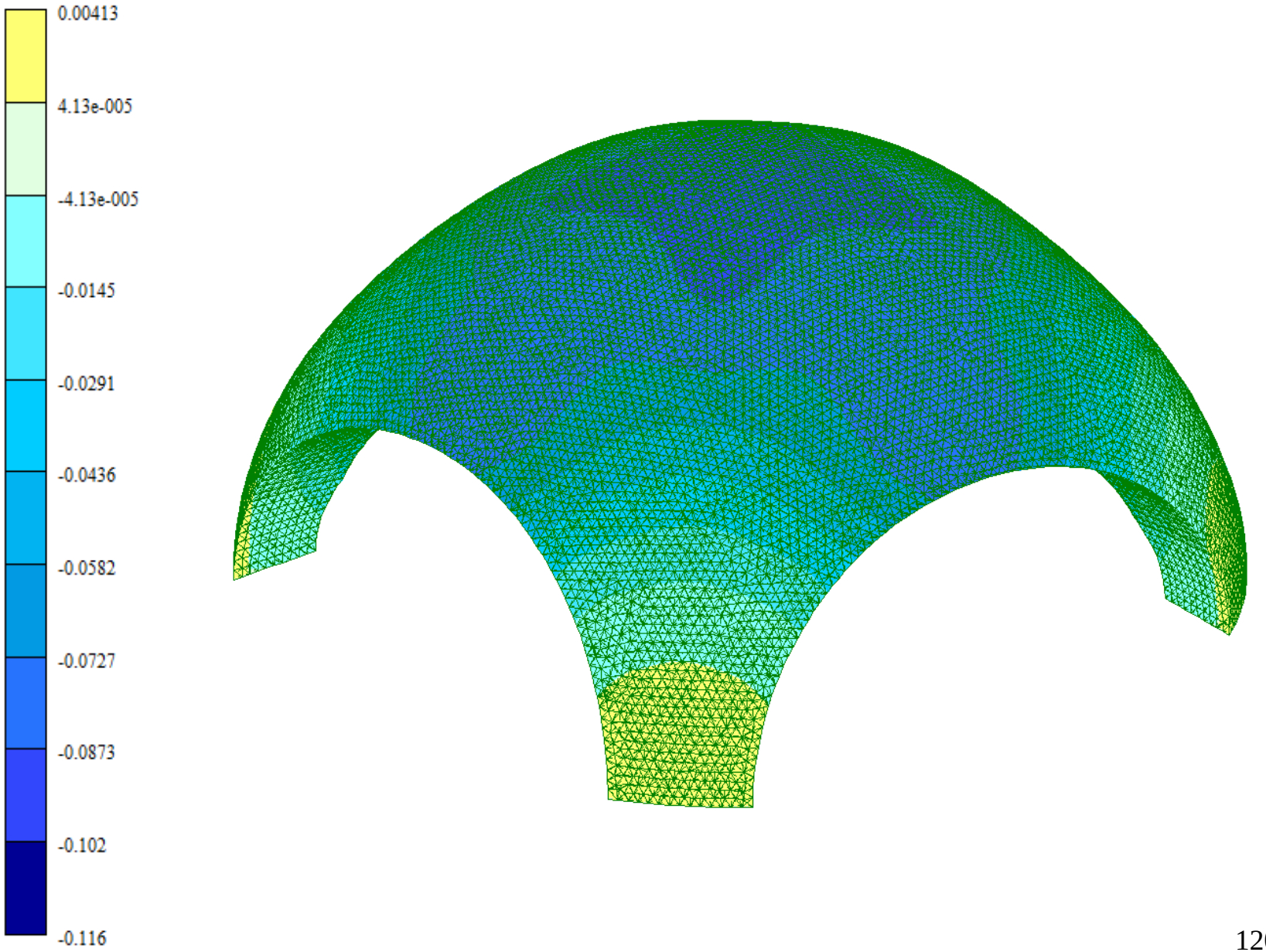


Рисунок 4.47. Переміщення по Z .Сфера з великим радіусом кривизни, мм

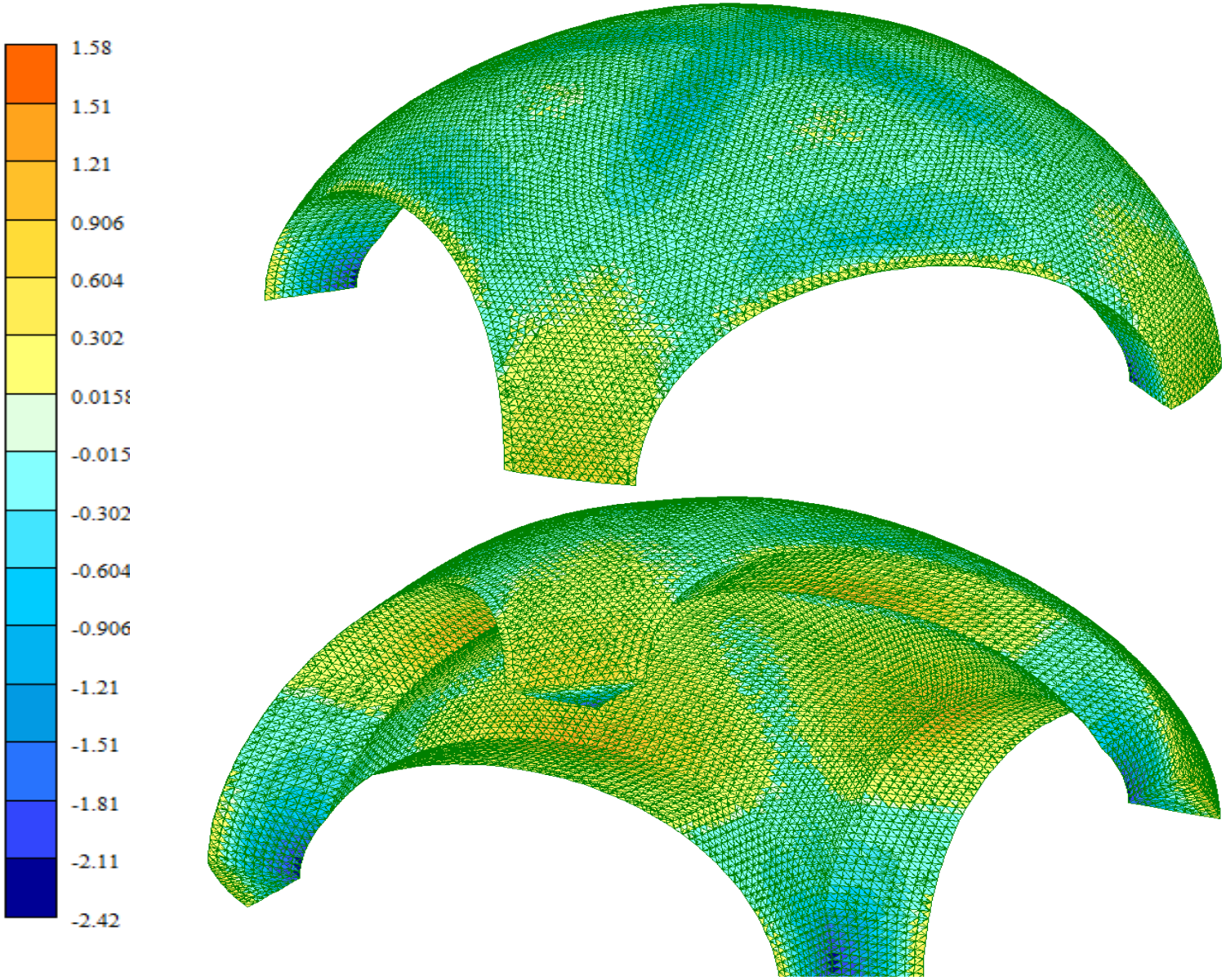


Рисунок 4.48. Напруження за теорією Генієва. Сфера з великим радіусом кривизни, МПа

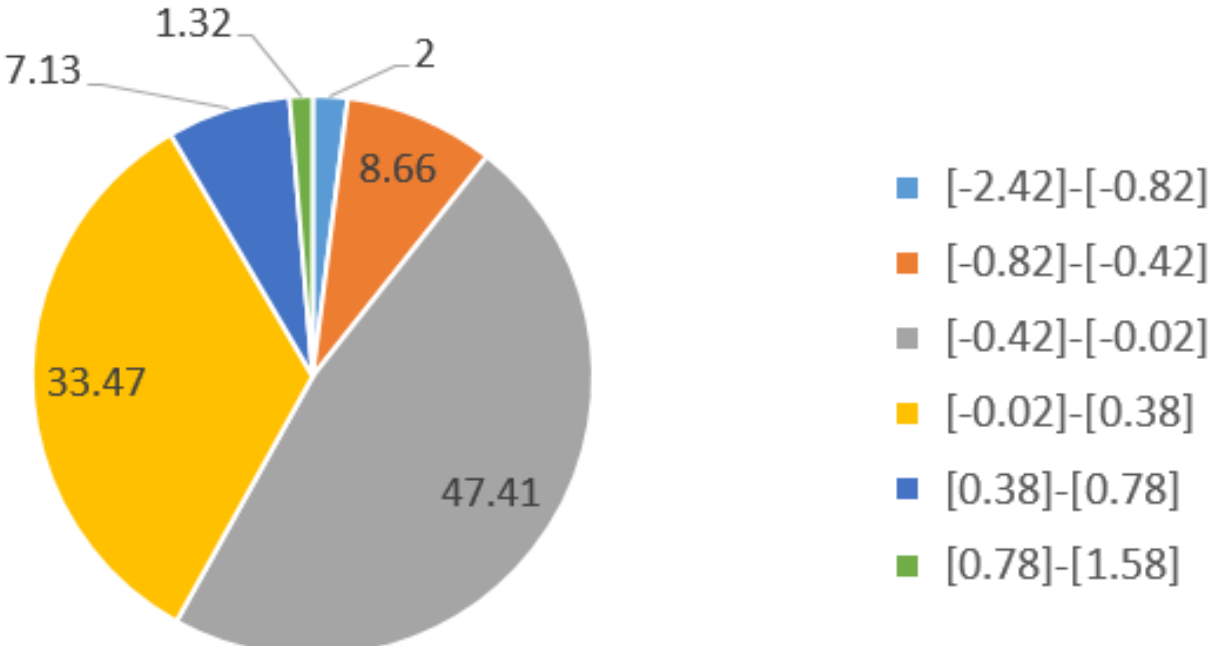


Рисунок 4.49. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від напружень за теорією Генієва (Rt=1.8 МПа, Rc=17 МПа)

Сфера з великим радіусом кривизни, МПа

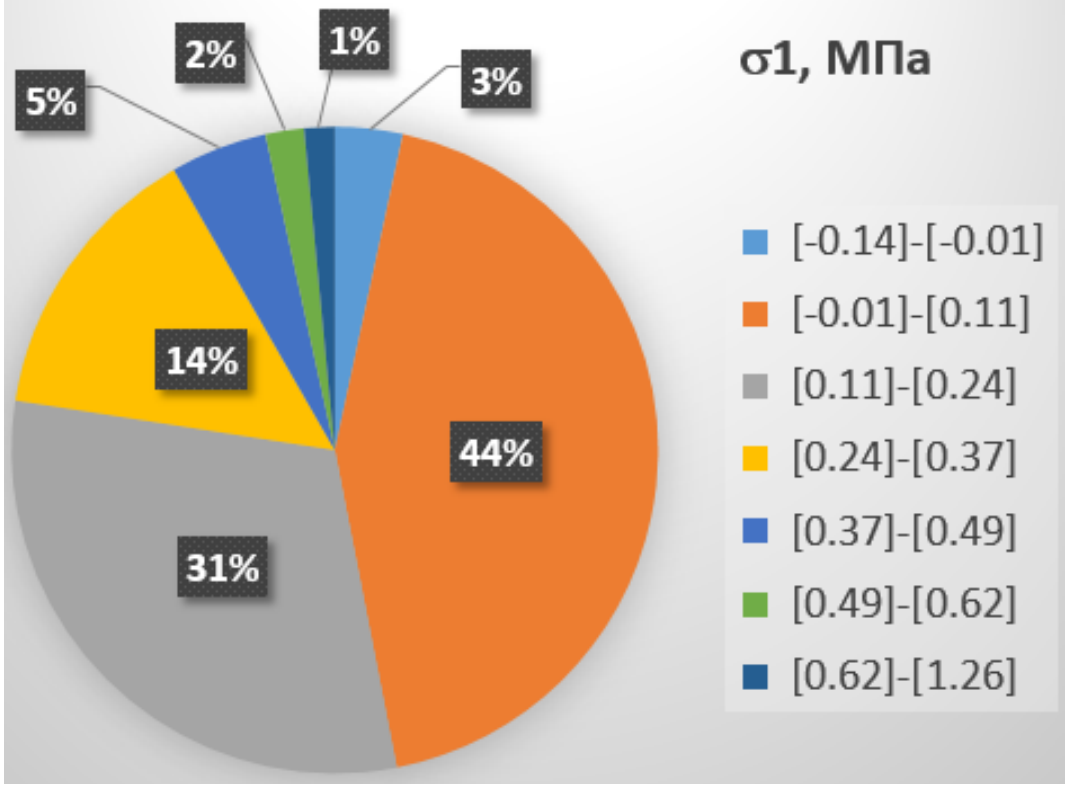


Рисунок 4.50. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від головних напружень σ1

Сфера з великим радіусом кривизни, МПа

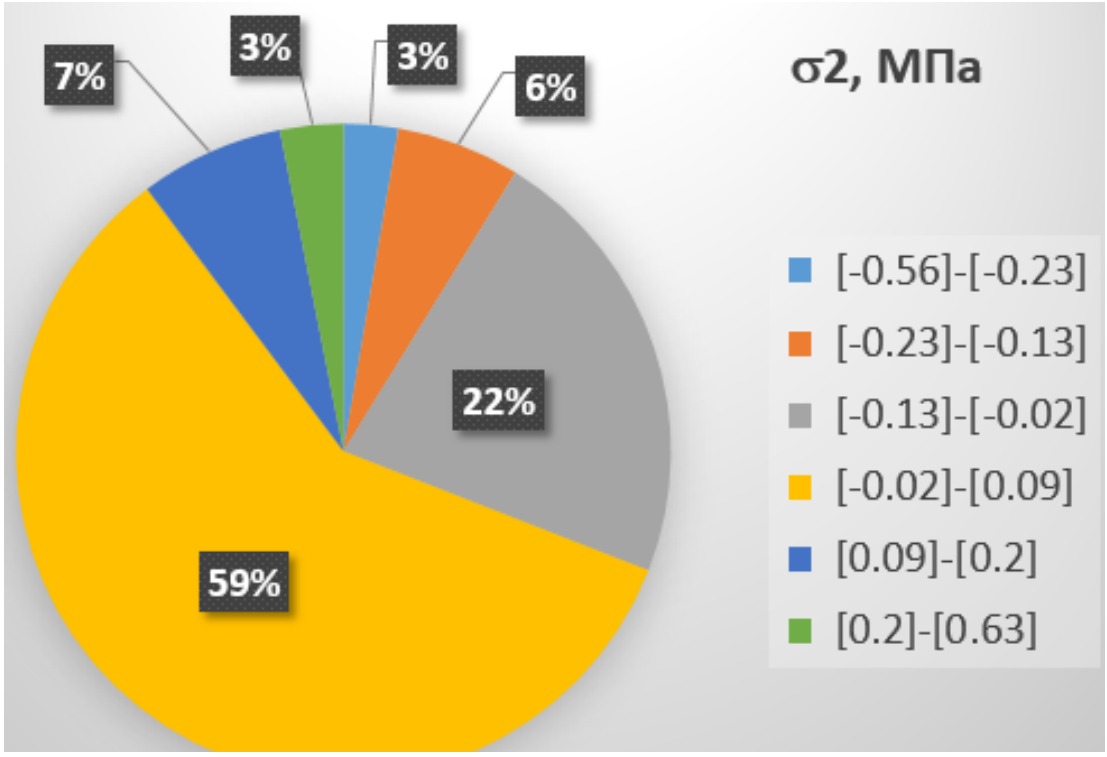


Рисунок 4.51. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від головних напружень σ2

Сфера з великим радіусом кривизни, МПа

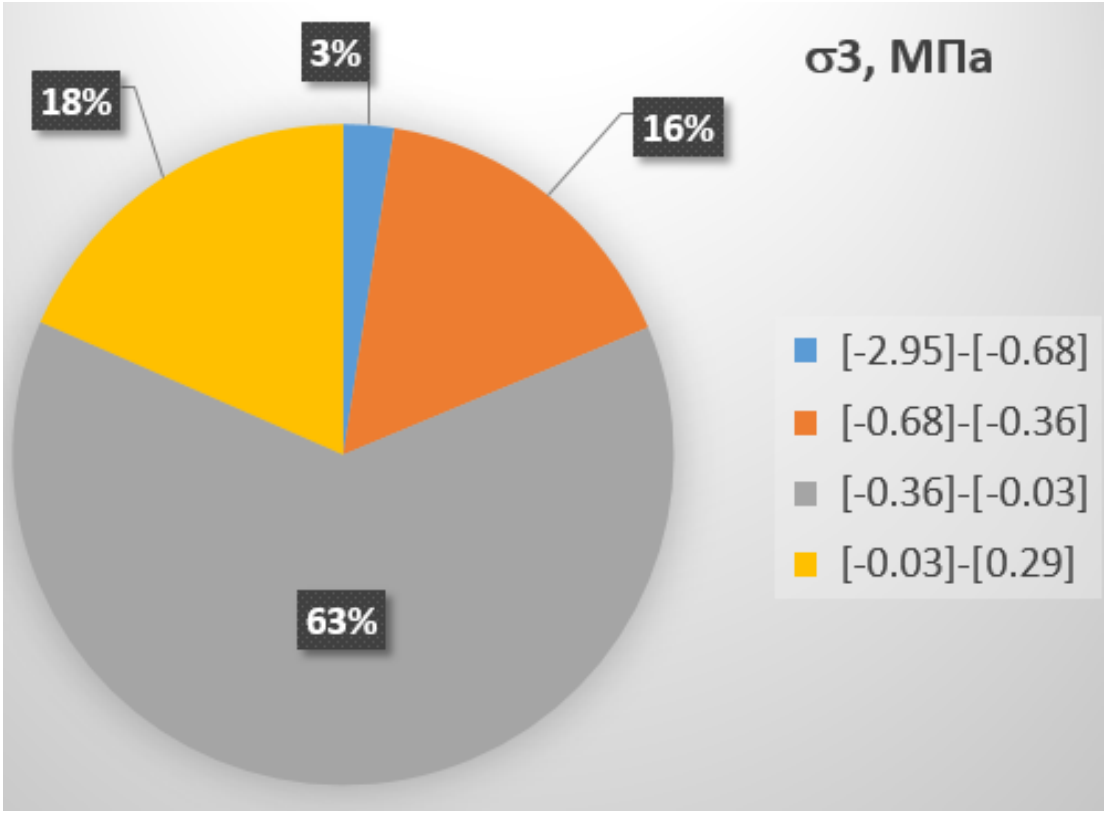


Рисунок 4.52. Кількість скінченних елементів у відсотках в залежності від головних напружень σ3

Сфера з великим радіусом кривизни, МПа

4.7. Оцінка вогнестійкості конструктивно-анізотропних залізобетонних плит

Виконано розрахунки температурних полів для 30, 60, 90, 120, 180 і 240 хв. Під час аналізу чисельного експерименту поведінки конструкції при впливі на неї стандартної пожежі побудовано тривимірну СЕ модель конструктивної системи, яка дозволила вирішувати температурну задачу в нестаціонарних умовах [79, 80, 81]. Розрахунки виконувались у середовищі ПК «Ansys». За утеплювач при розрахунку температур розглядався вогнетривкий екструдований пінополістирол. Отримано розподіл температури як по висоті бетонного перерізу, так і по утеплювачу (рис. 4.53).

На рис. 4.54 показано розподіл температури по висоті перерізу плити перекриття після впливу стандартної пожежі, по товщині залізобетонного перерізу (ребро) і утеплювача (вкладка-пустотоутворювач).

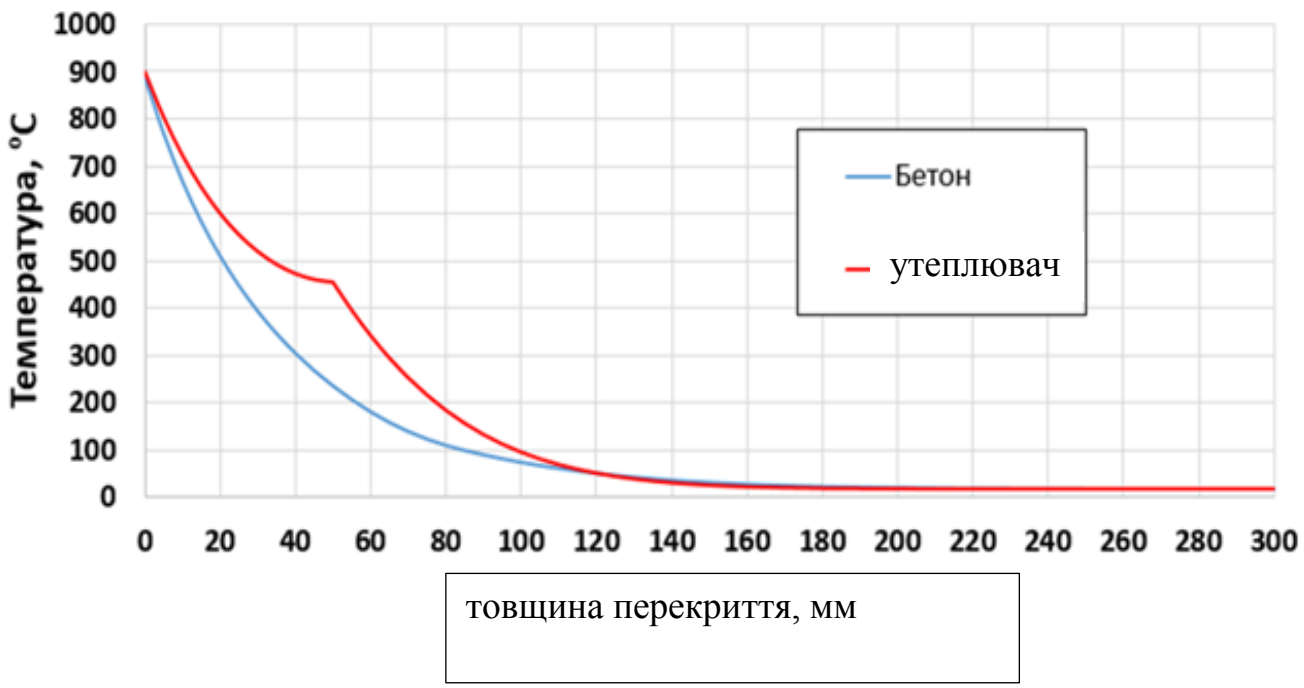


Рисунок 4.53. Розподіл температури за висотою перерізу плити перекриття через 60 хв. при нагріванні в режимі стандартної пожежі

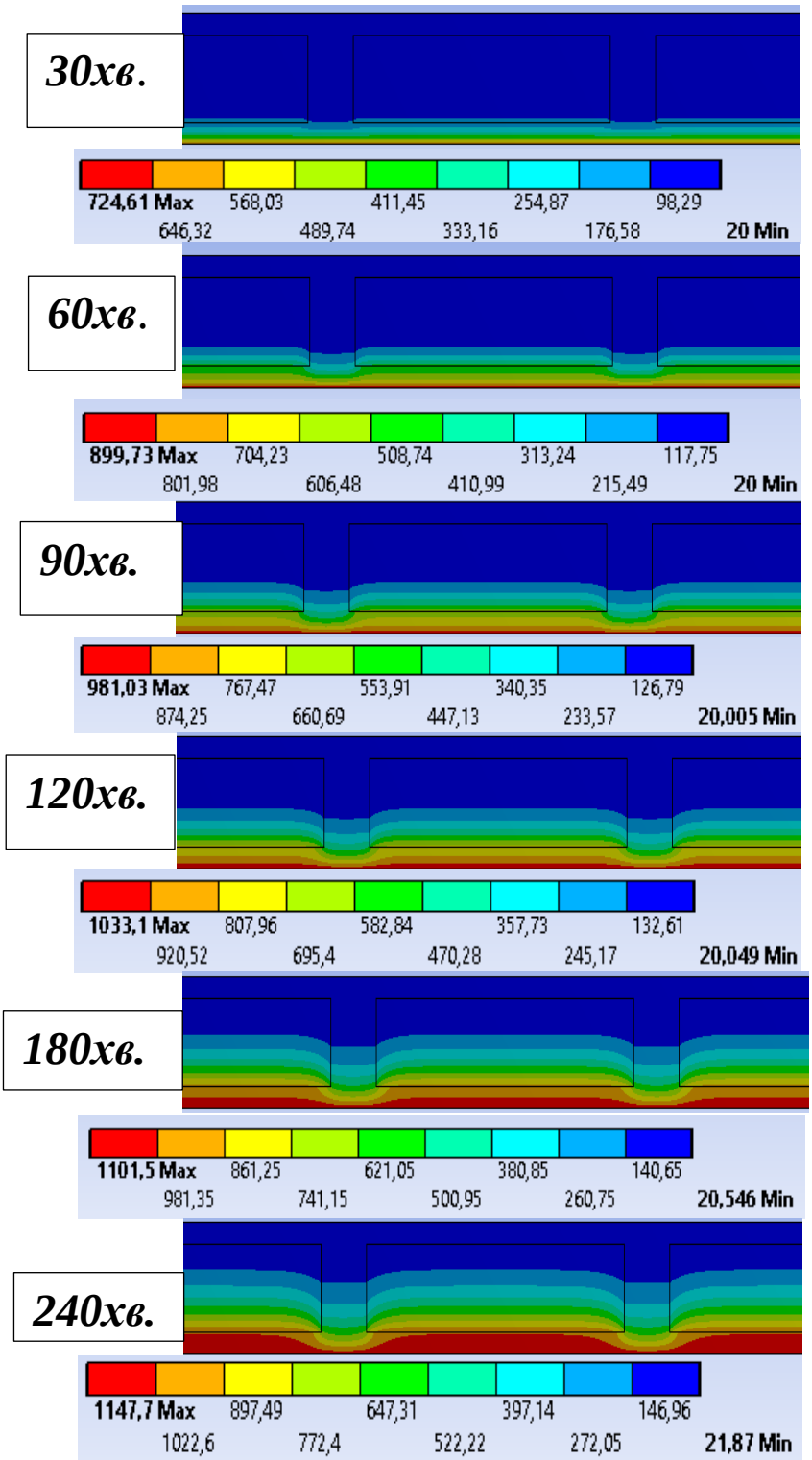


Рисунок 4.54. Ізополя розподілу температур для визначених нормативними документами меж вогнестійкості для плити 300мм

Аналіз температурних ізополів показує, що при встановленні арматурних стрижнів на відстань 30 мм (при товщині обшивки 50 мм), у конструкції товщиною 300 мм діють температури по бетонному перерізу 395°С і по утеплювачу 520°С. Чисельний аналіз температурних полів анізотропних оболонок у нестаціонарних умовах дозволив оцінити їх вогнестійкість, яка дорівнює REI60.

Для плит перекриттів житлових і адміністративних будівель найчастіше ставиться вимога вогнестійкості R60. Оскільки нижня обшивка розтягнута, то негативний вплив високих температур на міцність бетону не є визначальним фактором. При установці арматурних стержнів на відстань 30 мм від найбільш розтягнутої зони перетину при R60 діють температури для плит 300 мм і 500 мм приблизно однакові по бетонному перетину 395 ° С, по утеплювачі 520 ° С. Дані значення температур по бетонному перетину навіть трохи нижче тих значень, що наводяться в ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 діє до: 2012 Єврокод 2. «Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість »(EN 1992-1-2: 2004, IDT) для суцільної плити перекриття товщиною 200 мм [82, 83]. При впливі таких температур міцність арматури знижується на 25-30%, що є допустимим, оскільки корисні навантаження відповідно до нормативних документів під час пожежі знижуються. Як наслідок, товщина нижньої обшивки має бути не менше 50 мм.

4.8. Висновки до розділу 4.

1. Аналіз проведених досліджень напружено-деформованного стану конструктивно-анізотропних оболонок свідчить, що при експериментальному навантаженні 10 кН/м^2 максимальні величини переміщень від рівномірно-розподіленого навантаження дорівнюють: для моделі циліндричної оболонки - 0,242 мм при повному навантаженні; при

прикладанні рівномірно-розподіленого навантаження на ½ циліндричної оболонки максимальні переміщення становлять 0,192 мм; та при прикладанні рівномірно-розподіленого навантаження на 1/3 циліндричної оболонки максимальні переміщення становлять 0,157 мм.

2. Аналіз експериментального дослідження сферичної оболонки свідчить, що при прикладанні рівномірно-розподіленного навантаження на всю поверхню конструктивно-анізотропної оболонки 10 кН/м^2 максимальні величини переміщень від рівномірно-розподіленого навантаження дорівнюють 0,78 мм; при навантаження ½ поверхні оболонки максимальні переміщення становлять 0,39 мм; при ¼ - 20, 26 мм і при експериментальному прикладанні рівномірно-розподіленного навантаження 10 кН/м^2 на 1/8 поверхню сферичної оболонкі максимальні величини переміщень становили 0,195 мм.
3. Аналіз температурних ізополів показує, що при установці арматурних стрижнів на відстань 30 мм (при товщині обшивки 50 мм) у конструкції плит товщиною 300 мм діють температури по бетонному перетину 395°С і по утеплювачу 520°С.
4. Таким чином, система навантаження, система вимірювання, розроблений і запатентований спосіб випробувань плит і оболонок різної гаусової кривизни в комплексі дозволили вирішити в процесі випробувань наступні завдання: підтвердити отримані теоретичні дані експериментальним шляхом та оцінити деформований стан залізобетонних анізотропних оболонок.

РОЗДІЛ 5
УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1. Упровадження через проектування

Проведено чисельне дослідження НДС складної архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса, виконаної з важкого конструкційного бетону з вкладишами з пінополістиролу. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів (МСЕ) в спеціалізованих програмних комплексах з додатковою обробкою вихідних даних [84, 85]. Наведено методику аналізу НДС великих об'ємних СЕ моделей будівельних конструкцій з урахуванням концентраторів напружень і можливості появи, вироджених СЕ в результаті автоматичної тріангуляції.

Архітектурно-композиційний комплекс у формі стрічки Мебіуса може використовуватися як елемент ігрових і спортивних майданчиків, паркових комплексів та іншого. Але головним призначенням даного споруди є демострація можливостей будівельної галузі. Конструкція має як складну зовнішню конфігурацію (рис.5.1), так і не менш цікаву внутрішню будову (рис.5.2.), для реалізації яких використовується спосіб безопалубочного бетонування, а саме - торкретування.

Рисунок 5.1. Загальний зовнішній вигляд.

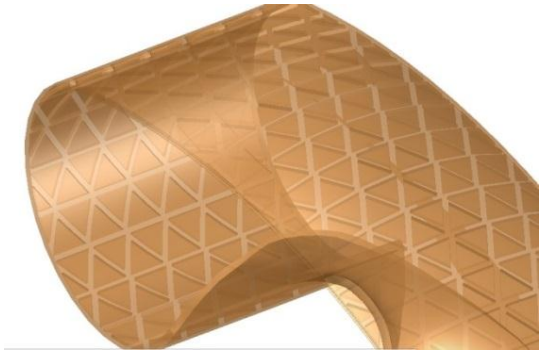


Рисунок 5.2. Розташування вкладишів.

Торкрет-бетонування - спосіб нанесення на оброблювану поверхню одного або декількох шарів бетону через шланг під потужним тиском повітря. В результаті нанесення розчину утворюється ущільнений шар торкрету, властивості котрого відрізняються від властивостей бетону (торкрет має підвищену механічну міцність, морозостійкість, водонепроникність, характеризується кращим зчепленням з поверхнею оброблюваної конструкції). Оскільки створення криволінійної опалубки - дорогий, непростий і тривалий процес, що вимагає висококваліфікованих працівників, то повна відмова від опалубки будь-якого типу дозволяє значно знизити фінансові витрати і час на зведення споруди.

Розчин наноситься безпосередньо на арматурний каркас, сформований таким чином, щоб повторювати обриси будуємої конструкції. Між стрижнями каркасу знаходяться пінополістиролові вкладиші-пустотоутворювачі. Проміжки між вкладишами при бетонуванні утворюють ребра жорсткості, які забезпечують розподіл зусиль і спільну роботу зовнішніх і внутрішніх обшивок.

Використання вкладишів дозволяє полегшити конструкцію і заощадити великий обсяг бетону. Але дані включення в залізобетонну конструкцію змінюють звичний характер роботи та принцип розрахунку, оскільки утворюється багатошарова конструкція. Всі ці закономірності викладені в «Тришарові залізобетонні конструкції» [86], написання В.М. Майбородою та В.Ф. Карпюком. Необхідно враховувати характер роботи зв'язків між цими шарами. Ідеальним варіантом є забезпечення спільної роботи зв'язків в місцях їх контакту. Ці нюанси так само враховуються при розрахунку конструкції в ПК «ЛІРА-САПР».

Дослідженнями роботи оболонок формоутворенням будівельних конструкцій різноманітних форм, трансформацією геометрії конструкції при раціоналізації її параметрів займалися у різні часи такі вчені, як В.С. Шмуклер, Г.В. Васильков, А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров, Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, В.М. Фридкин, В.М. Бабаєв, Joo-Hong Chung, Sung-Hoon Kang, Seung-Chang Lee, Chang-Sik Choi, Hyun-Ki Choi та інші [87-111].

Стрічка Мебіуса має складну геометричну будову. Її можна розбити на кілька простих ділянок, які мають власний радіус кривизни (рис. 5.3, 5.4, 5.5.).

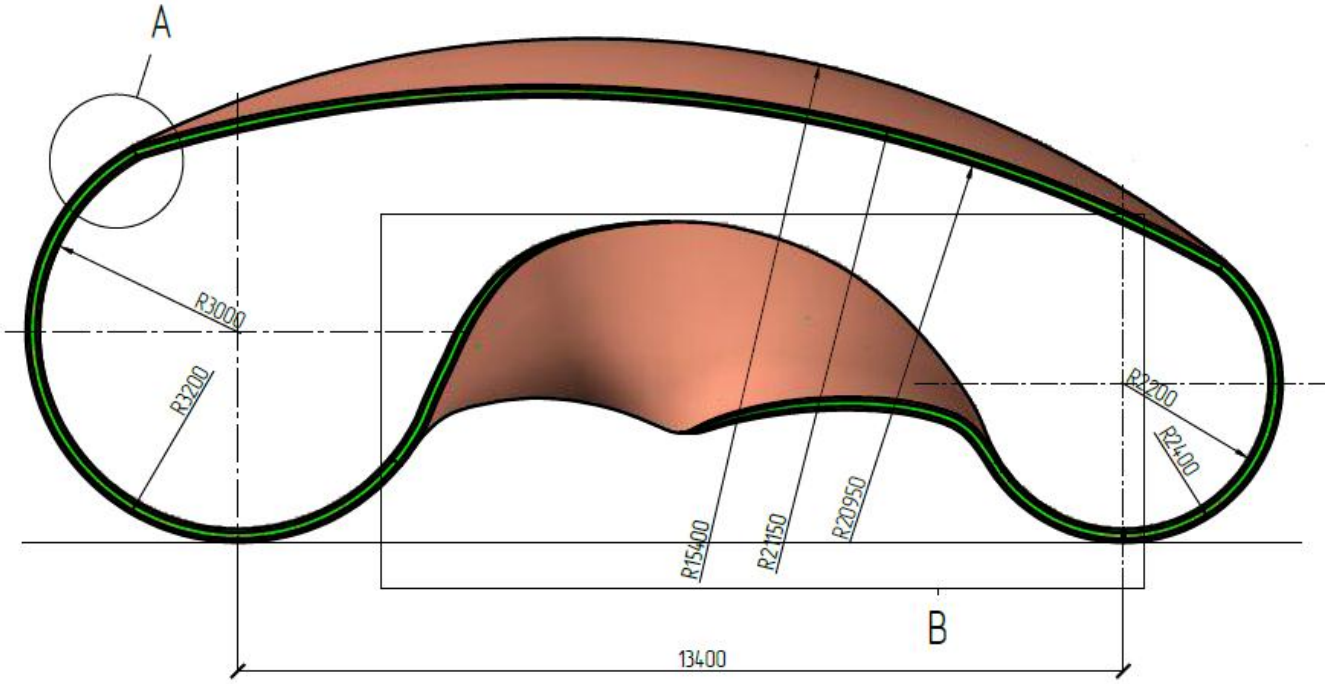


Рисунок 5.3. Геометрична будова фасаду. В плані конструкція має розміри 19 х 6; відстань між опорами – 13.4 м; максимальна висота – 7.6 м.

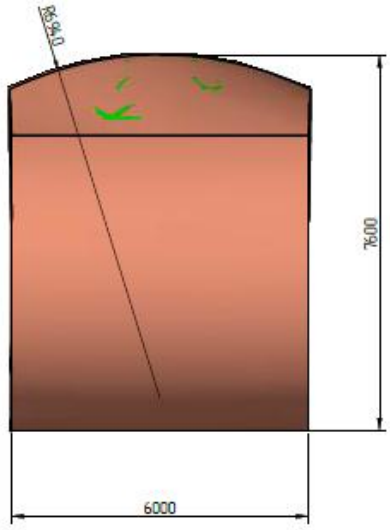


Рисунок 5.4. Вид збоку.

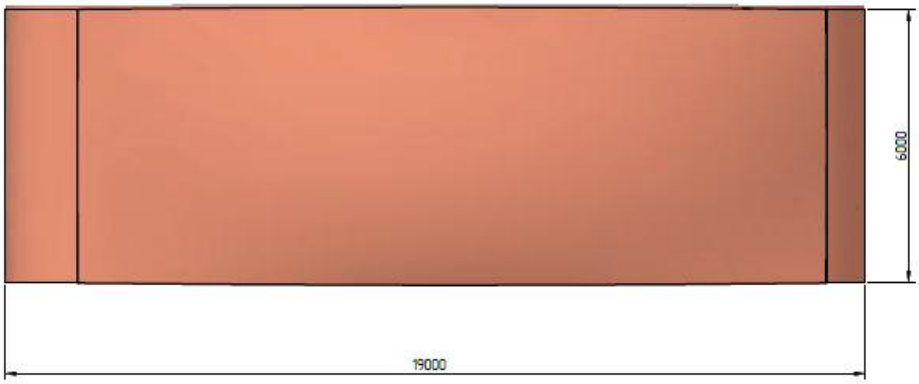


Рисунок 5.5. Вид зверху.

Внутрішню будову (рис. 5.6) обумовлено наявністю вкладишів-пустотоутворювачів, похованих в тіло конструкції. Загальна, конструктивна

товщина становить 200 мм, наведена - всього лише 110 мм (з урахуванням ребер). Товщина зовнішньої і внутрішньої обшивок - 50 мм кожна. Товщина пенополістиролових вкладишів - 100 мм.

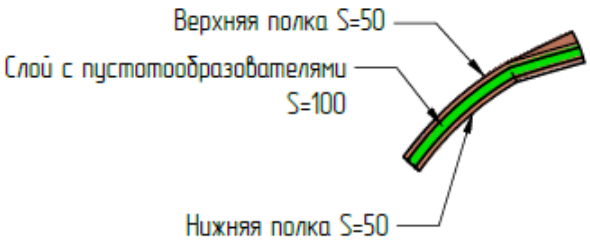


Рисунок 5.6. Розріз. Внутрішня будова.

Вкладиші-пустотоутворювач мають форму правильного трикутника, розміри якого підібрані з урахуванням уніфікації, загальних габаритів конструкції, необхідної товщини утворених ребер жорсткості.

Споруда є багатошаровою тільки у верхній її частині. Початок відліку положення пустотоутворювачів визначається величиною 1 м. Інша частина комплексу є одношаровою залізобетонною.

Після втілення даного проекту в життя він прийме вигляд, представлений на рис. 5.7 і рис. 5.8.

Рисунок 5.7. Візуалізація.

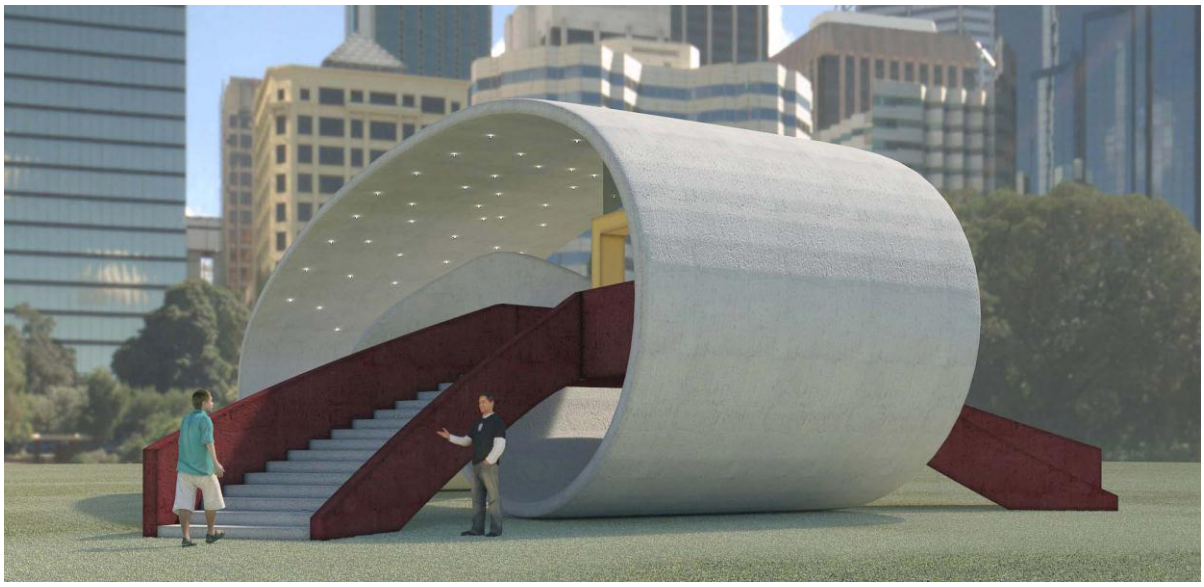


Рисунок 5.8. Візуалізація.

Для аналізу НДС розглянутої конструкції був обраний ПК «ЛІРА-САПР», але для створення об'ємної СЕ моделі було прийнято рішення провести тріангуляцію в ПК «Ansys», а потім здійснити імпортування отриманої моделі в ПК «ЛІРА-САПР», для подальшого розрахунку.

Єдиний формат даних об'ємних СЕ, підтримуваних в ПК «Ansys» і в ПК «ЛІРА-САПР» є .msh.

На жаль, при імпорті моделі, виконаної з об'ємних СЕ, за допомогою даного формату не було отримано бажаного результату.

Процедура імпортування в ПК «ЛІРА-САПР» з ПК «Ansys» [112, 113, 114] зазвичай реалізується за допомогою файлу з розширенням .msh.

При конвертації даного об'єкта дослідження об'ємні елементи СЕ моделі перетворилися в плоскі, що унеможливлювало подальший розрахунок.

Отже, виникла необхідність конвертації моделі на вхідній мові процесора ПК «ЛІРА-САПР».

Послідовність дій, перш ніж досліджувана модель конструкції знайшла свого остаточного вигляду в ПК «ЛІРА-САПР»:

• виникнення ідеї - розробка плоскої моделі майбутньої конструкції, визначення форми, габаритів, призначення;

• Autodesk 3DS MAX - створення 3D моделі за розробленими раніше кресленнями для візуалізації і подальшого імпорту. Модель композиційної споруди у вигляді стрічки Мебіуса складно описати певною математичною закономірністю, тому структура формувалася графічно. Як підсумок, отримали модель, яка описана криволінійними площинами, але не мала внутрішньої структури [89];

• Autodesk AUTOCAD - завдання обсягу, внутрішньої структури моделі, розміщення вкладишів-пустотоутворювачів. Підготовка моделі для подальшого імпорту [113];

• ПК «Ansys» - автоматичне перетворення об'ємної моделі в СЕ модель за допомогою тріангуляції. Завдання матеріалів, навантажень і подальший розрахунок;

• IDE Microsoft Visual Studio - написання програм для конвертації СЕ сітки з ПК «Ansys» в ПК «ЛІРА-САПР» шляхом вилучення даних про вузли та елементи з моделі ПК «Ansys» і перетворення їх на вхідну мову ПК «ЛІРА-САПР»;

ПК «ЛІРА-САПР» - аналіз отриманої моделі. Завдання матеріалів, навантажень і подальший розрахунок [113, 114, 115, 116].

Скінченно-елементна модель містить 41484 вузлів і 158226 елементів. Тип кінцевих елементів - 32 (тетраедр) (рис. 5.9.).

Даний СЕ призначений для міцністного розрахунку континуальних об'єктів і масивних просторових конструкцій. У кожному з вузлів СЕ є по три ступені свободи U, V, W, що представляють собою лінійні переміщення уздовж осей X 1, Y 1, Z 1, позитивні напрямки яких збігаються з напрямком відповідних осей [115].

Інформаційне моделювання будівлі [117, 118, 119, 120, 121] - це підхід до проектування, оснащення, експлуатації та ремонту будинку (управління життєвим циклом об'єкта), який передбачає комплексну обробку архітектурно-конструкторської, технологічної, економічної та іншої інформації про будівництво з усіма її взаємозв'язками і залежностями в єдиній інформаційній

структурі. Інформаційна структура (база даних), основана на 3-D моделі, містить опис топології і просторового розташування всіх елементів будинку (стін, колон, діафрагм, перекриття, окон, дверей та ін.).

До СЕ моделі (рис.5.9.) було докладено рівномірно розподілене навантаження 160 кг / м^2 і власна вага. Так як в ПК «ЛІРА-САПР» ще не реалізована можливість завдання розподіленого навантаження по криволінійній поверхні, навантаження було задане у вигляді зосереджених сил, прикладених до вузлів, які лежать на даній поверхні. Оскільки розташування вузлів на верхній межі рівномірне, то можливо моделювання рівномірно розподіленого навантаження з інтенсивністю N = q * A / 2300 = 6,18 кг.

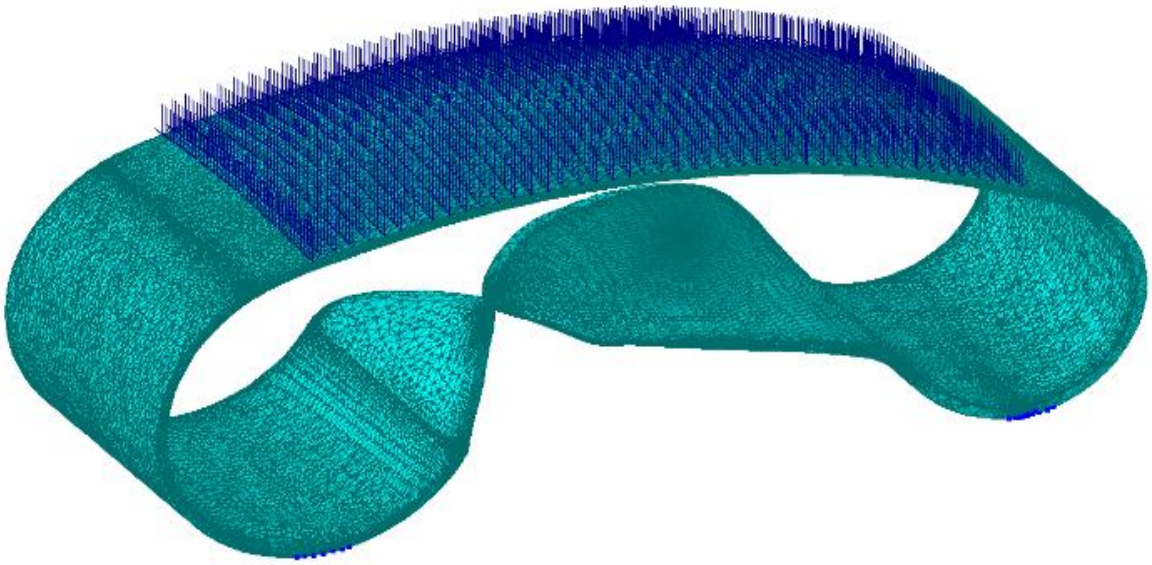


Рисунок 5.9. Скінченно-елементна модель з прикладенним рівномірно розподіленим навантаженням.

Проведено чисельне дослідження НДС складної архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса, виконаної з важкого конструкційного бетону з вкладишами з пінополістиролу. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів в спеціалізованих програмних комплексах з додатковою обробкою вихідних даних. Наведено методику аналізу НДС великих об'ємних СЕ моделей будівельних конструкцій з

урахуванням концентраторів напружень і можливості появи, вироджених СЕ в результаті автоматичної тріангуляції. Вирішена задача порівняння НДС конструкції, модель якої виконана з об'ємних скінченних елементів, в ПК «Ansys» і ПК «ЛІРА-САПР».

Були проаналізовані отримані результати розрахунку, визначені мінімальні і максимальні значення головних напружень і процентне співвідношення елементів в залежності від величини головних напружень. За цим співвідношенням побудовані стовпчасті графіки, показані на рис. 5.10-5.12. Графіки наочно показують, що кількість елементів, що мають значення головних напружень близькі до максимальних і мінімальних значень, становить менше 0,1%.

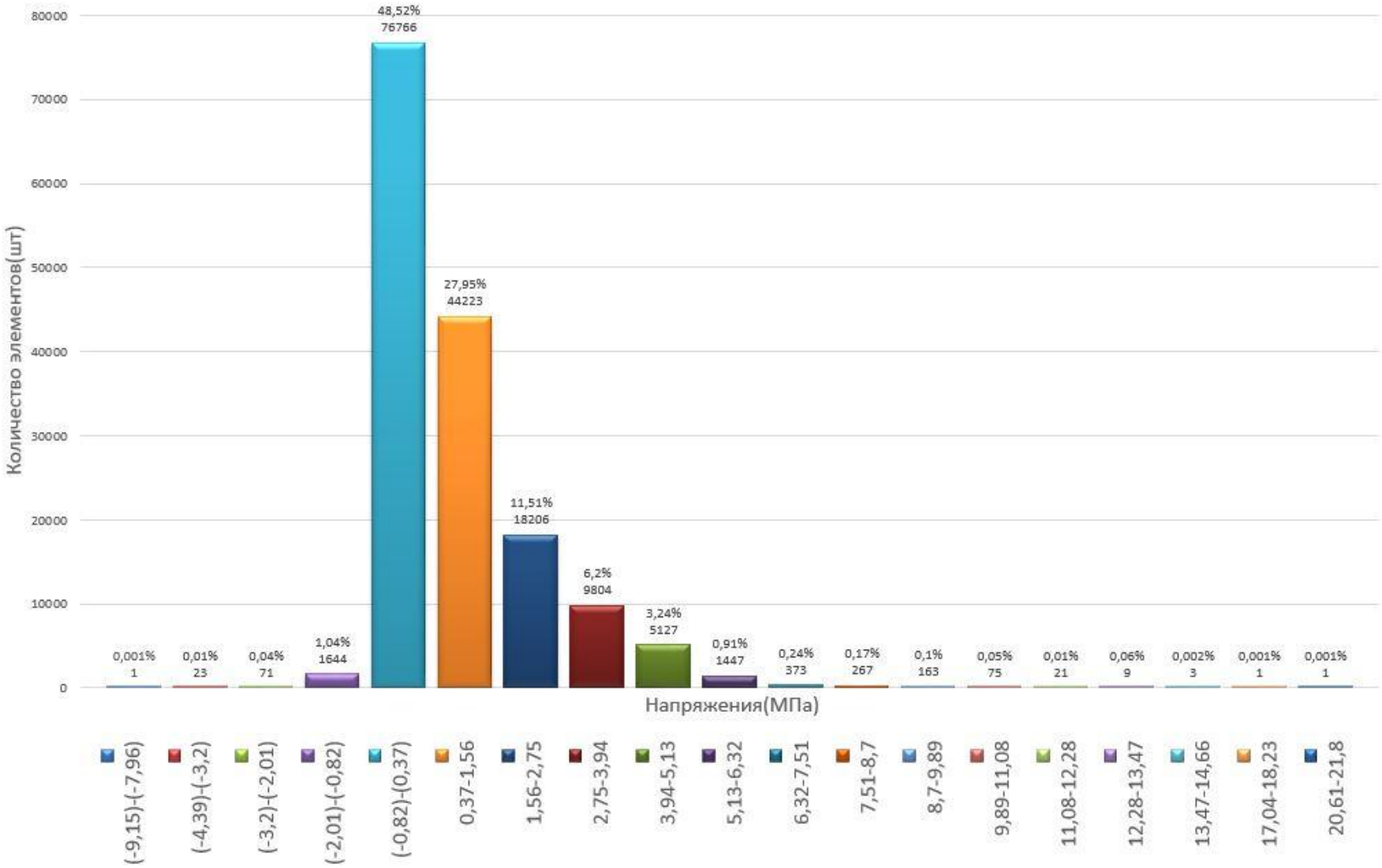


Рисунок 5.10. Кількісний графік елементів в залежності від значення максимальних головних напружень σ_1.

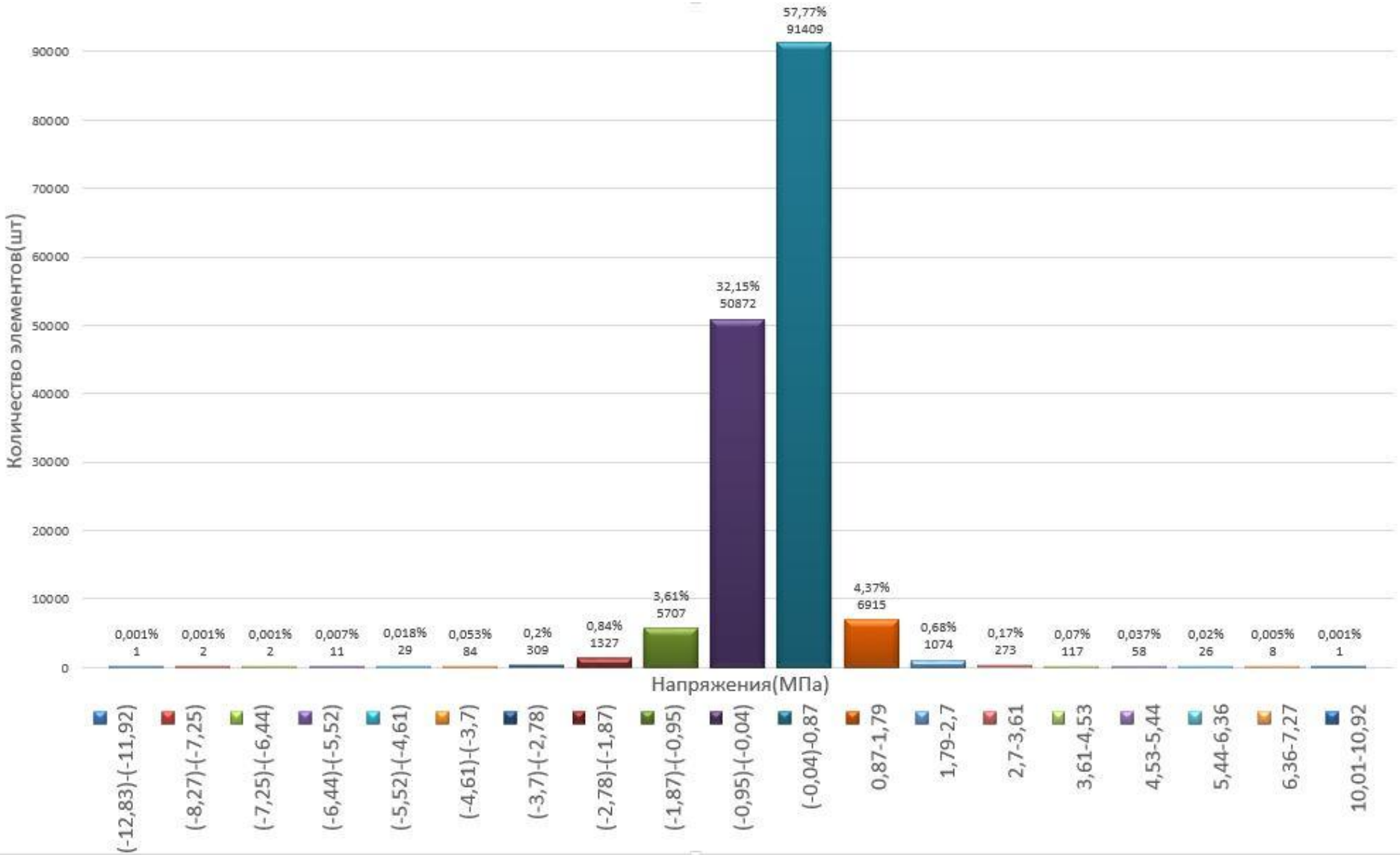


Рисунок 5.11. Кількісний графік елементів в залежності від значення максимальних головних напружень σ_2.

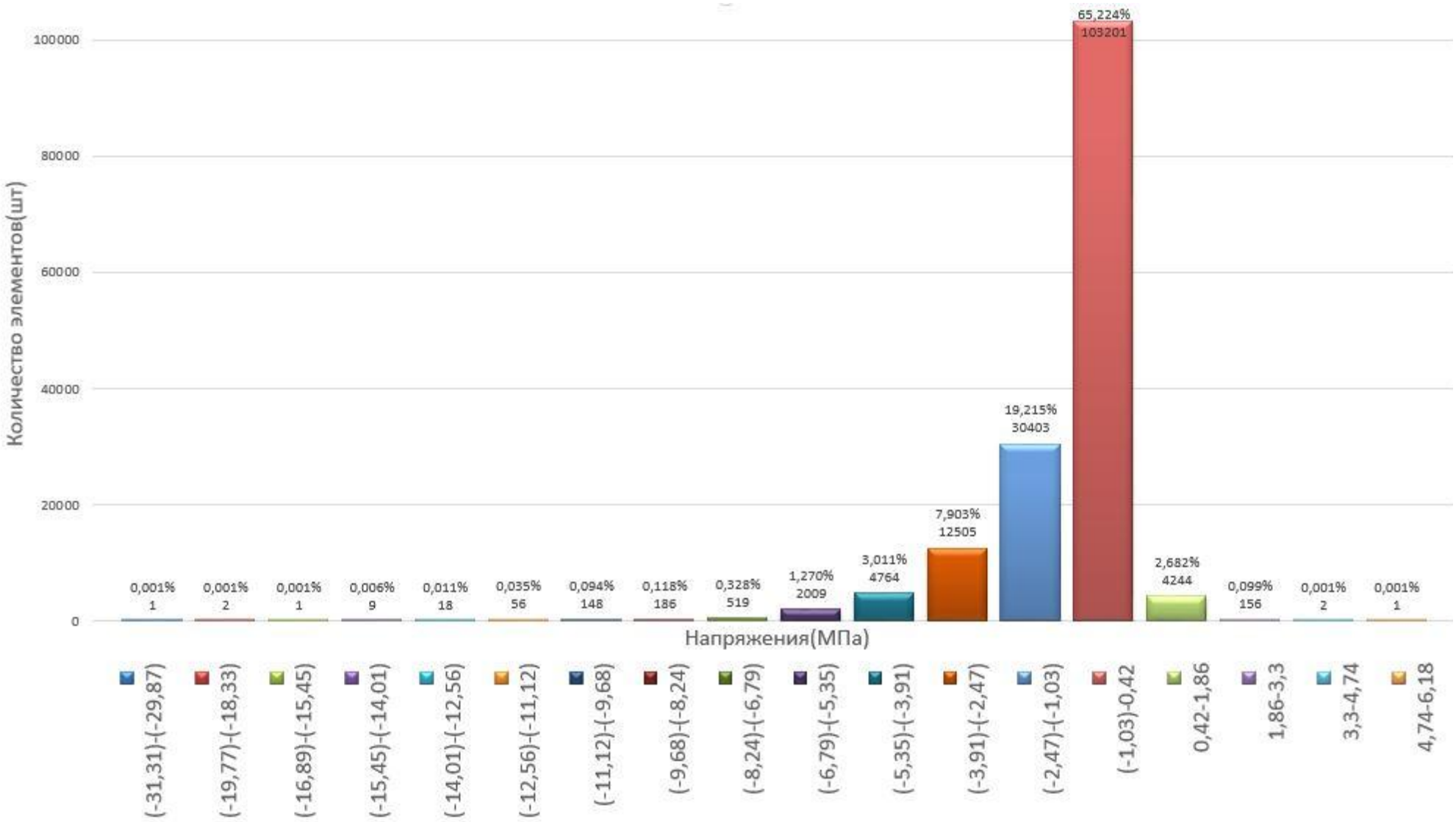


Рисунок 5.12. Кількісний графік елементів в залежності від значення максимальних головних напружень σ_3.

5.2.Упровадження через будівництво.

Об’єктом упровадження (додаток А) стали плити перекриття нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4 у м. Харкові.

Будівля має змінну поверховість і підвал по всьому периметру (рис.5.13.). У плані (рис.5.14.) об'єкт являє собою складну конфігурацію, яку умовно можна розділити на три обсягу: основна частина будівлі являє собою чотириповерховий обсяг, який праворуч від головного входу розділений аркою, для входу в дворову частину споруди, з Г - подібним обсягом. Двоповерховий обсяг будівлі, розділений деформаційних швом з чотириповерхової частиною, товщина стін в становить 1400 мм.

Рисунок 5.13. Головний фасад будівлі Рисунок 5.14. План будівлі

За своєю конструктивною схемою будівля бескаркасна, з несучими поздовжніми стінами, з відстанню в світлі між гранями від 4,0 ... 5,0 м з східної і північної сторони 10,0 ... 14,0 м з південної та західної сторони.

Підставою під фундаменти будівлі служать темно-сірі суглинки в водо насиченому стані, текучі пластичні. Розрахунковий опір грунту визначали відповідно до вказівок [122] R = 0,7 кгс / см^2.

Конструкція існуючих фундаментів є цегляна кладка з керамічної повнотілої цегли розміром 270 × 135 × 65 мм, покладеного на вапняно-піщаному розчині, глибина закладення яких становить 1200 мм від рівня чистої підлоги існуючого підвалу. На відстані 700-800 мм від поверхні підлоги рівень ґрунтових вод, який може підніматися на 400 мм. Ширина основ фундаменту становить 1500-1600 мм.

Капітальні стіни будівлі, виконані з червоної керамічної цегли на вапняному або цементно-піщаному розчині. Товщина стін змінна по висоті в різних частинах будівлі від 1250 мм до 510 мм. Перемички отворів в основному: цегляні, клинчасті, арочні і дерев'яні.

Міжповерхові перекриття будівлі виконані у вигляді дерев'яного накату з балок. Поверх накату покладені лаги з кроком 50-60 см. Перекриття підвалу бетонні по металевих балках (рейках) на заповнювачі з цегляного бою. Крок балок в різних частинах будівлі становить 750-1200 мм.

Суцільному візуальному обстеженню було піддано: фундаменти, стіни, перекриття, перемички, сходи, покриття, перегородки, віконні прорізи, підлоги, внутрішня обробка, електромережі, частина водопровідних мереж та вентиляція.

Виявлено, що фундаменти, велика частина стін, дерев'яні перекриття, сходи, перегородки, віконні прорізи, підлоги, горищне перекриття та покрівля знаходяться в задовільному технічному стані і не мають значних пошкоджень, що знижують їх несучу здатність [123]. Стіни підвальній частині мають місця сильного перезволоження, часткового руйнування цегляної кладки і швів заповнення.

На підставі проведених обстежень, аналізу архітектурно-конструктивних та об'ємно-планувальних особливостей, теоретичних розрахунків, технічного стану і ступеня фізичного зносу основних несучих і огороджувальних будівельних конструкцій необхідно зробити висновок, що в цілому будівля знаходиться в задовільному стані. Частина дворової східної і північної стін

будівлі знаходяться в незадовільному стані - наявність наскрізних тріщин (розломів) на всю висоту будівлі.

Для підвищення експлуатаційної довговічності конструкцій згідно нормативних документів [123, 124, 125 , 126 , 127, 128, 129, 130] будівлі були визначені наступні рекомендації:

- на пошкоджених ділянках стін провести ін'єктування тріщин;
- провести роботи по влаштуванню монолітної плити підлоги підвалу з одночасною її гідроізоляцією і з закладенням в несучі стіни будівлі;
- для підвищення просторової жорсткості будівлі все перекриття необхідно виконати монолітними, котрі спиралися б на весь контур внутрішніх і зовнішніх стін. Одночасно з пристроєм такого перекриття по контуру стін виконати двосторонні монолітні залізобетонні торкрет-обойми в підвалі на першому поверсі, що підвищують жорсткість контуру будівлі.

Був проведено причинно-наслідковий аналіз відмов конструктивної системи висотної будівлі [131, 132], виконано просторовий розрахунок міцності будівлі. Розрахунок був проведений в середовищі ПК «Ліра-Сапр», який фундований методом скінченних елементів (МСЕ). У зв'язку з чим, була створена просторова СЕ модель будівлі, що складається з 270 123 вузлів і 283 238 елементів (додаток С).

При побудові СЕ-моделей все розміри в плані і розміри перетинів прийняті відповідно до робочих креслень. Клас бетону С25 / 30. Арматура класу А400С і Вр-1, підрахований модуль деформації: Е = 1000 МПа. Коефіцієнт ліжку заданий С1 = 1000 т / м^3. Фундаментна плита і плити перекриття змодельовані за допомогою універсальних трикутних і чотирикутних СЕ плити. Стіни - за допомогою універсальних трикутних і чотирикутних СЕ оболонки. Було створено і розглянуто 2 моделі: перша включала в себе стрічковий фундамент з коефіцієнтом постелі С1 (281264 вузла і 290513 елементів), у другій моделі стіни і колони були жорстко затиснені біля основи (270754 вузла і 283238 елементів).

Розрахунок проведено в лінійній постановці. До конструкції було докладено навантаження: від власної ваги конструкцій, корисне навантаження, снігове навантаження і вітрове навантаження, які прикладалися послідовно до поздовжнього і торцевого фасадам будівлі.

Ізополя поздовжніх напружень в стіні вище рівня першого поверху Nz, т / м^2.

Для службових приміщень характеристичне значення навантаження становить 200 кгс / м^2 . Сумарне розрахункове навантаження на плити перекриттів склало ~ 1т / м^2. Аналіз напружено-деформованого стану стін будівлі показав, що напруги в кладці на нижніх ярусах (б = 147 т / м^2) перевищують її несучу здатність. Максимальна напруга в простінках вище 1-го поверху не перевищують б = 57.2 т / м^2. Результати чисельних досліджень наведені у додатку С. Конструктивні рішення залізобетонних плит перекриттів приведені на рис.5.15.

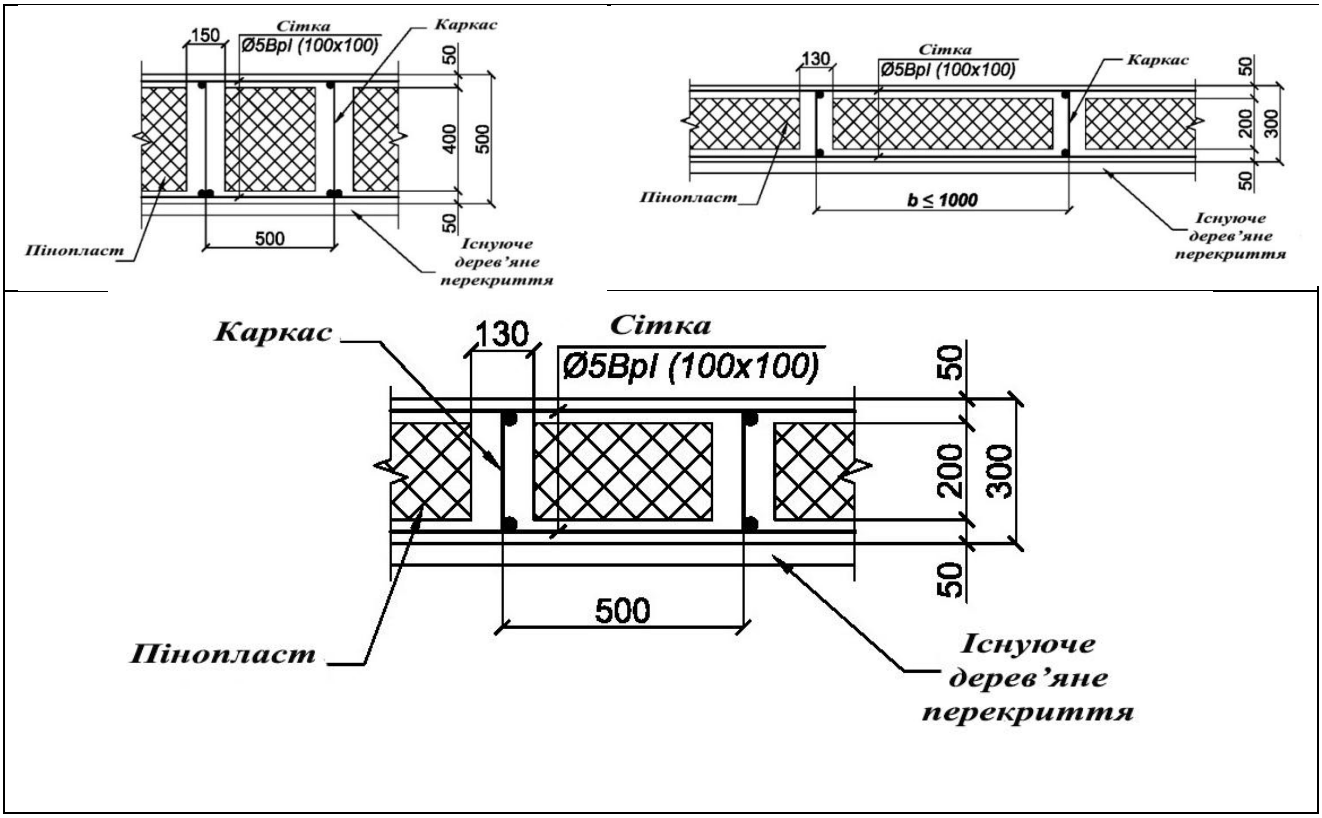


Рисунок. 5.15. Конструктивні рішення плит перекриттів

На рис. 5.16 показано конструкцію перекриття у процесі зведення

Рисунок 5.16. Конструкція перекриття в процесі зведення.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують, що результати дисертаційної роботи доцільно використовувати при зведенні анізотропних оболонок різної гаусової кривизни. У роботі наведено порівняння техніко-економічних показників (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1.

Зіставлення техніко-економічних показників оболонок

№	Конструкція	Конструктивна товщина	Приведена товщина	Витрати матеріалів		Трудомісткість	Відносна вартість
				арматура	бетон		
		см	см	кг	$м^3$	люд-год	%
1	Класична залізобетонна оболонка	300	300	1038	34,8	37,8	100
2	Розглянута залізобетонна анізотропна оболонка	300	150	555	17,9	47,5	65

5.3. Висновки до розділу 5

1. Упровадженя через проектування і аналіз НДС запроектованної будівлі проведено методом скінченних елементів у спеціалізованих програмних комплексах із додатковою обробкою вихідних даних. Наведено методику аналізу НДС великих об’ємних СЕ моделей будівельних конструкцій з урахуванням виникнення концентраторів напружень і можливості появи вироджених СЕ у результаті автоматичної тріангуляції. Вирішено задачу порівняння НДС конструкції, модель якої виконана з об’ємних скінченних елементів, у ПК «Ansys» і ПК «ЛІРА-САПР». Порівняння показало відмінності в результатах по переміщенням до 1% і більш суттєві відмінності по головним напруженням - до 20%.

2. Аналіз проведених теооретичних і експериментальних досліджень підтверджує її конкурентоспроможність, у порівнянні з вибраним аналогом, та що результати дисертаційної роботи доцільно використовувати при зведенні анізотропних оболонок різної гауссової кривизни. Проведений цикл теоретичних досліджень підтвердив репрезентативність і надійність прийнятих конструктивних рішень.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено задачу раціоналізації параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок, за рахунок побудови алгоритмів, які реалізують управління їх напружено-деформованим станом.

1. Обгрунтовано, що при застосуванні в якості критерія раціоналізації мінімального значення потенційної енергії деформації, зовнішні параметри оболонки (стріла підйому, крок ребер, тощо), що визначені, забезпечують максимальну несучу здатність конструкції, максимізацію частоти основного тону власних коливань та мінімальні прогини системи. Визначено, що для розглянутих конкретних умов при значенні стріли підйому H ≈ 3,8 м потенційна енергія деформації досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень H та оцінки максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки.

2. Шляхом аналізу енергетичного портрету системи визначені внутрішні параметри, що відповідають умові квазіізоенергетичності оболонки. Виконаний аналіз розподілу щільності енергії деформації (внутрішній параметр) від кроку внутрішніх ребер для розглянутої оболонки показує, що значення потенційної енергії деформації при кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм досягає нижньої межі.

3. В результаті експериментальних та чисельних досліджень проведена верифікація переміщень конструктивно-анізотропних оболонок під дією рівномірно-розподіленого навантаження по всій поверхні оболонок, а також на 1/2 і 1/3 площі поверхні циліндричної оболонки й 1/2, 1/4 і 1/8 площі поверхні сферичної оболонки. Встановлено, що при навантаженні 10кН/м^2 максимальні величини переміщень під дією рівномірно-розподіленого навантаження дорівнюють: для моделі циліндричної оболонки - 0,242 мм при повному навантаженні; 0,192 мм при навантаженні на 1/2 поверхні; 0,157 мм при навантаженні на 1/3 поверхні. Для моделі сферичної оболонки 0,780 мм при

повному навантаженні; 0,390 мм при навантаженні 1/2 поверхні; 0,260 мм при навантаженні 1/4 поверхні; та 0,195 мм при навантаженні на 1/8 поверхні.

4. Уперше запропоновано і створено стенд і спосіб для натурних випробувань оболонок різної гауссової кривизни при дії різноманітних короткочасних та довготривалих навантажень.

5. Виконано чисельний аналіз поведінки конструкції в нестаціонарних умовах під впливом на неї стандартної пожежі. Виявлено, що у розглянутої конструкції товщиною 300 мм діють температури по бетонному перерізу 395°С і по утеплювачу 520°С. У зв'язку з чим, оцінена вогнестійкість конструктивно-анізотропних оболонок, яка дорівнює REI60.

6. Результати досліджень реалізовано при виконанні робіт по зведенню перекриття при реконструкції будівлі по майдану Павлівському, 4 у м. Харкові, а також при проектуванні архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бамбура А. Н., Сазонова И. Р., Гичко В. В. Разработка расчетной модели защитных оболочек энергоблоков АЭС //Будівельні конструкції. – 2015. – №. 82. – С. 238-246.

2. Барашиков А. Я. Методика розрахунку залізобетонних конструкцій за деформаційною моделлю згідно з проектом нових норм України //Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2005. – №. 1. – С. 13-18.

3. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – -М.: Издательство" Ассоциации строительных ВУЗов", 472 с., 2004.

4. Бондаренко В. М., Бондаренко С. В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона //М.: Стройиздат. – 1982. – С. 287.

5. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы / Вайнберг А.И. – Харьков: издательство «Тяжпромавтоматика», 2008. – 304с.

6. Молодченко Г. А. Регулирование напряженно-деформированного состояния стен емкостных сооружений //Коммунальное хозяйство городов. – 2002. – №. 39. – С. 33-36.

7. Большаков В. И., Савицкий Н. В. Электропроводящие нанокомпозиты для систем диагностики технического состояния герметизирующих оболочек АЭС

//Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – №. 5 (218).

8. Стороженко Л. І., Гасій Г. М., Гапченко С. А. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття. – 2015.

9. Гвоздев А. А., Байков В. Н. К вопросу о поведении железобетонных конструкций в стадии близкой к разрушению //Бетон и железобетон. – 1977. – №. 9. – С. 22-24. Расчет и конструирование сборных железобетонных рамношатровых перекритий для общественных // Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – №. 9. – С. 12-22.

10. А.Л. Шагін, Бондаренко В.М., Тимко И.А., Шагин А.Л.Расчет железобетонных плит и оболочек методом интегрального модуля деформаций – Харьков : 1967.- 132с.

11. Шугаев В. В., Соколов Б. С. Расчет и конструирование сборных железобетонных рамно-шатровых перекрытий для общественных зданий //Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – №. 9. – С. 12-22.

12. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек / Под ред.Абовского Н.П.:Наука, 1978.- 228 с.

13. А.С. Городецький, Гордон Л.А., Готлид А.А. Статический расчет бетонных и железоб1етонах конструкций гидротехнических сооружений.-М.: Энергоиздат, 1982.-240с.

14. М.І., Рейтман, Рейтман М.И. Новые методы расчета пространственных

железобетонных инструкций //Исследование конструкций зданий и сооружений для сельского стр-іа: Сб.тр. /ЦНИИЭПсельстрой. М., 1968. - Вып.2-1. - С.25-45.

15. Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций. – 2011.

16. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек. – 1976. – 512 с.

17. С.П. Тимошенко,. Пластины и оболочки . - М. : ЮГИЗ, 1948. - 460 с.

18. О.Р. Ржаніцин, Ржаницын А.Р. Расчет железобетонных оболочек методом предельного равновесия. -М.: Госстройиздат. -1958.

19. Chen W. T. A hyperboloidal notch in a transversely isotropic material under pure shear //Journal of Elasticity. – 1972. – Т. 2. – №. 2. – С. 113-122.

20. Reissner E., Reissner E On a Variational Theorem in Elasticity.- J. Math, and Phys., 1950, rol.29, № 2.

21. Reissner E. On the theory of bending of elastic plates.- J. Math. Phys., 23, 944. № 1.

22. Shanley F. Weight Strength Analysis of Aircraft Structures. N.York, M-c jrow - Hill, 1952.

23. Вольмир А.С. Гибкие пластины и оболочки.- М.: Гостехиздат, 1956.-420 с.

24. Новацкий В. Теория упругости. - М.: Мир, 1975. - 872 с.

25. Горенштейн Б.В. Железобетонные пространственные кострукции для строительства на Севере. – Л.: Стройиздат. ,1979. – 160с.

26. Дишингер Ф. Оболочки. Тонкостенные купола и своды. Гостройиздат, 1932.

27. Шухов В. Г., Избранные труды, том 1, «Строительная механика», 192 стр., под ред. А. Ю. Ишлинского, Академия наук СССР, Москва, 1977.

28. Бондаренко В. М. Посылки энергетической оптимизации железобетонных конструкций, воспринимающих знакопеременные нагрузки //Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2015. – №. 4.;

29. Бондаренко В. М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона //Харьков: Изд-во Харьковского ун-та. – 1968;

30. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. – Nauka, 1965.

31. Баженов В. А., Соловей Н. А. Нелинейное деформирование и устойчивость упругих неоднородных оболочек при термосиловых нагрузках //Прикладная механика. – 2009. – Т. 45. – №. 9. – С. 3-40.

32. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела . - М.: Наука, 1977. - 416 с.

33. Трушин С. И. и др. Расчет нелинейно деформируемых пологих сетчатых оболочек вариационно-разностным методом //Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – №. 3.

34. Кравченко Г. М. и др. Динамический расчёт и анализ полусферической оболочки покрытия объекта «Зимний сад» Технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) //Инженерный вестник Дона. – 2016. – Т. 40. – №. 1 (40).

35. Городецкий Д. А. и др. Программный комплекс ЛИРА САПР 2013: Учебное пособие //Киев–Москва.: Электронное издание. – 2013.

36. Перельмутер А. В. Заметки о прикладной науке //Computational Civil and Structural Engineering. – 2013. – С. 23.

37. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа (издание 4-е переработанное и дополненное).- Москва: Изд-во: СКАД СОФТ, Изд-во: ДМК Пресс, Изд-во: АСВ, 2011, 736 с.

38. Городецкий А. С., Шмуклер В. С., Бондарев А. В.. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. 889 с.

39. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 856 с.

40. Шмуклер В. С. Новые энергетические принципы рационализации конструкций / В. С. Шмуклер // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. - 2017. - Вип. 167. - С. 54-69.

41. Пат. №44125 Україна, МПК G 01 M19/00, G 01N 3/00, G 01 M 5/00. Пристрій для натурних випробовувань плит та оболонок / В.С. Шмуклер, А.А. Чупринін, Р. Аббасі.; заявник та власник Шмуклер Валерій Семенович. – № u200901598; заявл. 24.02.09; опубл. 25.09.09, Бюл. №12.

42. Капленко Д.Д., Способ изготовления ребристых, преимущественно облицовочных, плит, например, из бетона. Патент СССР №63397.

43. ДБН В2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.

44. Бугаевский С.А., Гапонова Л.В., Современные технологии получения облегченных железобетонных конструкций. In: IV Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства» м.Харків, ХНУМГ імені О.М. Бекетова. 25.11.2014-10.02.2015.

45. AirDeck® System. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.airdeck.com/

46. BubbleDeck® System. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bubbledeck-uk.com/
47. Cobiax® System. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cobiax.com/startseite
48. DALIFORM group. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ru.daliform.com/prodotti/categorie.php
49. Luis M. Bozzo. The Santa Fe II Tower. A central core, tall, slender building in Mexico / Concrete international. – 2014. – Vol. 36 No. 9. – pp. 51 – 54.
50. Mekjavić. I., Analiza izbočavanja betonskih sfernih ljusaka // Tehni ki vjesnik (Zagreb). 2011. №18. p. 633-639.
51. Цейтлин А. А., Маркзон Д.Г., Устройство для формирования железобетонных панелей-оболочек. Патент СССР №441148.
52. Майборода В.М., Карпюк В.Ф. Трехслойные железобетонные конструкции. – К.: Будівельник, 1990.– 144 с.
53. Бугаевский С.А. Применение самоуплотняющегося бетона в технологии устройства облегченные железобетонных перекрытий // Вестник ХНАДУ, вып. 69. – Харьков: ХНАДУ. – 2015. – С. 79-90.
54. Бугаевский С.А. Способ возведения элементов зданий криволинейной формы // Збірник наукових праць. Науковий вісник будівництва, вип. №2 (80). – Харків: ХНУБА ХОТВ АБУ. – 2015. – С. 116-126.
55. Бугаевский С.А. Минимизация отскока при торкретировании мокрым способом // Збірник наукових праць. Науковий вісник будівництва, вип. №2 (84). – Харків: ХНУБА ХОТВ АБУ. – 2016. – С. 269-276.
56. Пат. 89464 Україна, МПК E04B 1/18. Каркасна будівля «Монофант» / Шмуклер В.С., Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Бережна К.В., Карякін І.А., Кондращенко В.І., Сеірскі І.М.; заявник і патентовласник Шмуклер В.С. - №u201311919; заявл. 10.10.2013 ; публ. 25.04.2014, Бюл. №8.
57. Бабаев В.Н. Конструктивные системы для обьектов различного назначения. Опыт проектирования и возведения / В.Н. Бабаев, В.С. Шмуклер // Комунальне

господарство міст: наук. –техн. зб. – Харкыв: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. – Вип.114. – С.2-17.
58. Бугаевский С. А. Способ возведения элементов зданий криволинейной формы //Науковий вісник будівництва. – 2015. – №. 2. – С. 116-126.
59. Данилов. А.А. Способы построения трехмерных поверхностных триангуляций и тетраэдральных сеток. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2010, № 1(65). – С.87-92.
60. Гапонова Л.В. Експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованного стану сферичної оболонки покриття [Текст] / Гапонова Л.В., Калмиков О.А., Гребенчук С.С. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип.157. – С.102-113.
61. Гапонова Л.В. Напряженно-деформируемое состояние цилиндрической оболочки [Текст] / Гапонова Л.В., Калмиков О.А., Гребенчук С.С. // Коммунальное хазяйство городов. – 2016. –Вып. 126. – С 9-18.
62. Babaev, V. N. Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell / V.N. Babaev, V.S. Shmukler, S.H. Feirushah, L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk, O.A. Kalmikov // 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. – Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, 2016. – Iraq. p. 42-49.
63. В.С. Шмуклер. Каркасные системы облегченного типа // В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Буряк. Харьков: Золотые страницы, 2008, 336 с.
64. M. Yaghoubi, S.S. Mohtasebi, A. Jafari, H. Khaleghi. Design and manufacture of a new and simple mechanism for transmission of power between crossover shafts up to 135 degrees for farm. // XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)Hosted by the Canadian Society for Bioengineering (CSBE/SCGAB) Québec City, Canada June 13-17, 2010.

65. Bankole I. Oladapo, Balogun A. Vincent, Augustine O. Oke, Esoso A. Agbor. Design And Finite Element Analysis On Car Seat Height Screw Adjuster Using Autodesk Inventor / Dept. Of Mechanical & Mechatronics Eng,Afe Babalola University, Ado-Ekiti, Nigeria // (IJSRES).Volume 2 Issue 8, August (2015).
66. Oleg Kalmykov. Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July 2017.
67. Generalizable surrogate models for the improved early stage exploration of structural design alternatives in building construction. A Dissertation Presented to The Academic Faculty by Mehdi Nourbakhsh In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the School of Building Construction Georgia Institute of Technology May 2016 Copyright 2016 by Mehdi Nourbakhsh. (2016).
68. Bard, G. Borello,, C. Guigou, J. Negreira and J-L. Kouyoumji. Hallenges for acoustic calculation models in «Silent timber buld». / D. The 21st International Congress on Sound and Vibration 13-17 July, (2014).
69. E. Carrera. Theories and Finite Elements for Multilayered, Anisotropic, Composite Plates and Shells.. Arch. Comput. Meth. Engng. Vol. 9, 2, 87-140 (2002)
70. Пат. 113750 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. Стенд для натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер,С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № u 201608761; заявл.12.08.16; опубл. 10.02.17. Бюл. № 3.
71. Пат. 115153 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. – Спосіб натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського

господарства імені О.М. Бекетова. – № u 201608763; заявл. 12.08.16, опубл. 10.04. 17, бюл. № 7/2017.
72. Гребенчук, С.С. Экспериментальные исследования железобетонных анизотропных оболочек / Гребенчук С.С. // Журнал «Бетон и железобетон в Украине». – Полтава, 2017. – С. 18-26.
73. Gaponova L.V. Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell / L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk // Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering / Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University – 1(48)` 2017. – С.108-120.
74.Емельянова, И.А. Технологические особенности возведения сооружений криволинейной формы по строительной системе «Монофант» с использованием малогабаритного оборудования способом мокрого торкретирования / И.А. Емельянова, С.А. Гузенко, Д.О. Чайка, С.А. Бугаевский, Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 323-330.
75. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона: чинний від 2009-12-22. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 20 с.
76. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Будівельні матеріали . Бетони правила контролю міцності: чинний від 2010-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 27 с.
77. ДСТУ 3760:2006. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 28 с.
78. ДСТУ EN 10080:2009. Сталь для армування бетону. Зварювана арматурна сталь. Загальні вимоги (EN 10080:2005, ID). К. : Мінрегіонбуд України, 2012. – 68 с.
79. Гапонова, Л.В. Рішення температурної задачі для неоднорідної багатошарової конструкції / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць «Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві». – ЛНТУ. – 2016. – Вип. 5. – С. 199-214.

80. Гапонова, Л.В. Оценка огнестойкости конструктивно-анизотропной железобетонной плиты / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, С.С. Гребенчук // Міжвідомч. наук.-техн. зб. (технічні науки) «Будівельне виробництво». – Київ, 2017. – № 62/1. – С. 57-63.
81. Oleg Kalmykov. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017" (Transbud-2017) 10 July 2017.
82. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Еврокод 2. «Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие положения. Расчет конструкций на огнестойкость» (EN 1992-1-2:2004, IDT).
83. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6.-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84 і EN 1992-1-1 (Eurocod 2) / В.М. Бабаев, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова та ін.. за заг.ред. В.С. Шмуклера. – Харків: Золоті сторінки, 2015. – 208с
84. Гапонова, Л.В. Напряженно-деформируемое состояние архитектурно-композиционного комплекса в форме ленты Мебиуса / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 229-237.
85. Гапонова, Л.В. Архитектурно-композиционный комплекс в форме ленты Мебиуса // Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А Калмыков, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 337-350.
86. Майборода, В.М. Трехслойные железобетонные конструкции. / В.М Майборода, В.Ф. Карпюк – Будівельник, 1990. – 144с.
87. Шмуклер В.С. Исследование работы пологих железобетонных оболочек: дисс. канд. техн. наук Киев. НИИСК Госстроя СССР, 1977. - 188 с.

88. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетиче-ская парадигма. Ростов-на-Дону: Инфосервис, 2003

89. Шмуклер В.С. Трансформация внутренней геометрии конструкции при рационализации ее параметров // Юбилейные научные чтения по проблемам теории железобетона. ИПЦ МИКХиС, Москва, 2005. – с. 124 – 134.

90. Shmukler V. S., Evolutionist approach in rationalization of building structures. /ISEC-03 Third International structural Engineering and construction Conference, Shunan, Japan, 2005.

91. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «Лира-Windows». – Киев: Факт, 1997. – 137 с

92. Shmukler V. S., Evolutionist approach in rationalization of building structures. /ISEC-03 Third International structural Engineering and construction Conference, Shunan, Japan, 2005.

93. Фридкин В.М. Формообразование строительных конструкций. – М.: МГСУ, 2011, 171с.

94. Шмуклер В.С. Пространственные железобетонные каркасные системы многокритериального соответствия. // Дисс на соиск. уч. степени д-ра техн. наук. - Полтава, 1997.

95.БабаєвВ.М., Бугаєвський С.О., Євель С.М., Євзеров І.Д., Лантух-Лященко А.І., Шеветовський В.В., Шимановський О.В., Шмуклер В.С. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем. – К.: Вид-во «Сталь», 2017. – 404с.

96. Patent USA № 20130036693. Doughnut-shaped hollow core body, bidirectional hollow core slab using the same, and construction method thereof / Seung Chang Lee, Jeong Keun Oh, Chang Sik Choi, Hyun Ki Choi. – Опубл. 14.02.2013.

97. Joo-Hong Chung, Sung-Hoon Kang, Seung-Chang Lee, Chang-Sik Choi, Hyun-Ki Choi. An Experimental Study for Bond Characteristics of Deformed Bar

Embedded in Donut Type Biaxial Hollow Slab / Journal of the Korea Concrete Institute/ – 2013. – Vol. 25 No. 2. – pp. 155-163.

98. Joo-Hong Chung, Sung-Hoon Kang, Seung-Chang Lee, Chang-Sik Choi, Hyun-Ki Choi. One-Way Shear Strength of Donut Type Biaxial Hollow Slab Considered Hollow Shapes and Materials / Journal of the Korea Concrete Institute / – 2012. – Vol. 24 No. 4. – pp. 391-398.

99. Sang-Su Ha, Jun-Seon Yoon, Kyoung-Hwan Yoo. Consideration of Field Application Possibility and Structural Capacity of Hollow Core Slab using GFRP Bars / Pacific Science Review / – 2013. – Vol. 15 No 1. – pp. 30-36.

100. Olexandr Meneiliuk, Kuz'ma Shavva, Valentina Taran. Erection of lightweight solid slabs at the construction site / Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2013, том 9, номер 4. – С. 221-229.

101.A. Churakov. Biaxial hollow slab with innovative types of voids / Строительство уникальных зданий и сооружений. – ISSN 2304-6295, №6 (21), 2014. – С. 70-88.

102. Hurd M.K. Concrete Homes for Disaster Victims. Inflated forms bring shelter to rural landslide victims. Concrete international, 2009, Vol. 31, No. 6, p. 37-40.

103. Jan Dirk van der Woerd. Finding new forms for bearing structures by use of origamics. Proceedings of The 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22-25 July 2012, Karlsruhe, Germany / Edited by Harald S. Müller, Michael Haist, Fernando Acosta, p. 263-268.

104. Jozef Jasiczak, Wtodzimierz Majchrzak, Wtodzimierz Czajka. Construction of undulating walls using dry-mix shotcrete. Expansive concrete surface creates the main spatial element inside the Museum of the History of Polish Jews in Warsaw, Poland. Concrete international, 2015, Vol. 37, No. 6, p. 31-35.

105. Sidney Freedman Craftsmanship Award Winners Announced. 2013 marks the second year for the annual competition. Concrete international, 2013, Vol. 35 No. 10, p. 34-37.

106. Benjamin Kromoser. Methods for transforming flat concrete plates into double curved shell structures. Proceedings of The 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22-25 July 2012, Karlsruhe, Germany / Edited by Harald S. Müller, Michael Haist, Fernando Acosta, p. 275-280.

107. Benjamin Kromoser, Johann Kollegger. Bilding free formed concrete surfaces by using the “pneumatic wedge method”. The 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Universite Laval, 21-23 July 2014, Quebec, Canada / Edited by Josee Bastien, Nicolas Rouleau, Mathieu Fiset, Mathieu Thomassin, p. 303-308.

108. Mike Mota. Voided Slabs. Then and now. Concrete international, 2010, Vol. 32, No. 10, p. 41-45.

109. Christian Albrecht. Experimental and theoretical analyses of the load-bearing behaviour of slim biaxial hollow core slabs with flattened void formers. Proceedings of The 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Karlsruhe Institute

of Technology (KIT), 22-25 July 2012, Karlsruhe, Germany / Edited by Harald S. Müller, Michael Haist, Fernando Acosta, p. 85-90.

110. Luis M. Bozzo. The Santa Fe II Tower. A central core, tall, slender building in Mexico. Concrete international, 2014, Vol. 36 No. 9, p. 51-54.

111. Self-Consolidating Concrete: A Synthesis of Research Findings and Best Practices. Prepared by: John W. Henault, P.E., February 14, 2014, Research Project: SPR-2255, Final Report, Report No. CT-2255-F-12-4.

112. http://www.ansys.com

113. http://www.liraland.ru/http://www.autodesk.ru/products

114. Научно-исследовательский институт автоматизированных систем в строительстве Госкомградостроительства Украины. Програмный комплекс Лира-Windows. Руководство пользователя. Том IV. Раздел 3. – Киев, 1997 – С. 2-28.

115. Титаев, В.А. Автоматизация расчёта строительных конструкций на примере ЛИРА-подобных программных комплексов. / Титаев, В.А. – Хабаровск, 2001. – С. 146-149.

116. Демчина, Б.Г. Особливості розрахунку багатошарових плит перекриття на ПК «ЛІРА» / Демчина Б.Г., Рутковська І.З., Вознюк Л.І. // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2009. – Т.5, №4. с. 179-185.

117. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона: проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии / [А.С Городецкий, Л.Г. Батрак, Д.А. Городецкий та ін.]. – К.: Факт, 2004. – 105с.

118. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – М: Изд-во АСВ, 2009. – 360 с.

119. Барабаш М. С. и др. ЛИРА 9.2. Примеры расчета и проектирования Учебное пособие //Киев: Издательство «Факт. – 2005.

120. Городецкий Д. А. и др. Программный комплекс ЛИРА САПР 2013: Учебное пособие //Киев–Москва.: Электронное издание. – 2013.

121. Городецкий А. и др. Комплексные системы проектирования и управления строительство с использованием полнофункциональной информационной модели здания (BIM). зарубежный и отечественный, перспективы развития //Проблеми розвитку міського середовища. – 2014. – №. 2. – С. 181-191.

122. ДБН В.2.1-10-2009. «Основи та фундаменти споруд» – Київ.: Мінрегіонбуд України, 2009 – 90 с.

123. СОУ ЖКГ 75.11-35077234. 0015:2009 Житлові будинки. Правила визначення фізичного зносу житлових будинків, - Київ.: ЖКГ України. 2009. - 46 с.

124. ДБН В.2.6-162-2010. Конструкції будинків і споруд. Кам’яні та армокам’яні конструкції, – Київ.: Мінрегіонбуд України, 2011 – 104 с.

125. ДБН В.3.2-2-2009. Реконструкція, ремонт, реставрація об'єктів будівництва. Житлові будинки. Реконструкція та капітальний ремонт, - Київ.: Мінрегіон буд України, 2009 – 20 с.

126. ДБН В.2.2-9-2009. Громадські будинки та споруди. Основні положення, - Київ.: Мінрегіонбуд України. 2010 – 94 с.

127. ДБН В.1.2-14-2009. СНББ. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ, - Київ.: Мінрегіонбуд України, 2009 – 50 с.

128. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи, - Київ.: Мінбуд України. 2006 – 78 с.

129. ДСТУ Б В.1.2 -3:2006. Прогибы и перемещения, - Київ.: Минстрой Украины, 2006 г.

130. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляция будівель, - Київ.:Мінрегіонбуд України, 2017. – 33 с.

131. Барабаш М. С., Ромашкина М. А. Обеспечение конструктивной безопасности при проектировании высотных зданий с использованием ПК ЛИРА-САПР. – 2016. – С. 73-83.
132. Барабаш М. С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий // International journal for computational civil and structural engineering. – 2012. – Т. 8. – №. 3. – С. 58.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А.АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
Товариство з обмеженою
відповідальністю «РАТЬ»
_____
«___» _____2017.

АКТ
О ВПРОВАДЖЕННІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
«РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АНІЗОТРОПНИХ ОБОЛОНОК», виконаний здобувачем Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова Гребенчуком Сергієм Сергійовичем

Комісія в складі:
Голова комісії: генеральний директор ТОВ «РАТЬ» канд. техн.наук Константинов А.С.
Члени комісії:
доцент, канд. техн. наук ХНУМГ імені О.М. Бекетова Гапонова Л.В.
головний інженер ТОВ «РАТЬ» Карякін І.А.
здобувач ХНУМГ імені О.М. Бекетова Гребенчук С.С.

У період з 2016-2017 р. комісія провела роботу з визначення практичного впровадження результатів дисертаційної роботи «Раціоналізація параметрів залізобетонних анізотропних оболонок», і встановила наступне:

1. Розробка прийнята у впровадження в вересні 2016 р..
2. Характеристика впровадження.
   Впровадження результатів досліджень наукової роботи здійснено на об'єкті «Реабілітація нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4 – реставрація» при укладанні монолітного перекриття з використанням вкладишів пустотоутворювачів.
3. Результати впровадження.
   Застосування запропонованої конструкції перекриття забезпечило зниження витрат бетону до 38,4% в порівнянні з конструкцією суцільного перетину.
4. Висновки та пропозиції щодо подальшого використання розробки.
   Розроблена та досліджена конструкція монолітного перекриття придатна до застосування в будівлях і спорудах різного призначення.

Голова комісії: Константинов А.С.

Члени комісії: Гапонова Л.В.
Карякін І.А.
Гребенчук С.С.

ТОВ «Стальконструкція ЛТД»
61106 ГСП, м. Харків
вул. Плиткова,12,літ."АИ-3",пов.3,оф.43,52,54
Приймальня: (0572) 94-67-60
Факс: (057) 719-38-44
e-mail: stconstruction@ukr.net
http://www.steelconstruction.com.ua

ООО «Стальконструкция ЛТД»
61106 ГСП, г. Харьков
ул. Плиточная, 12,лит."АИ-3",эт.3,оф.43,52,54
Приёмная: (0572) 94-67-60
Факс: (057) 719-38-44
e-mail:stconstruction@ukr.net
http://www.steelconstruction.com.ua

НАДЕЖНЫЙ ПАРТНЕР В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

АКТ

про впровадження дисертаційної роботи на тему:

«Раціоналізація параметрів залізобетонних анізотропних оболонок», здобувача Гребенчука Сергія Сергійовича «Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

ГОЛОВА КОМІСІЇ: М.О. Мєлєнцов

ЧЛЕНИ КОМІСІЇ:

начальник виробничого відділу О.В. Колупаєв

докт.техн.наук, професор ХНУГХ імені О.М. Бекетова В.С. Шмуклер

канд.техн.наук, доцент ХНУГХ імені О.М. Бекетова Л.В. Гапонова

здобувач ХНУГХ імені О.М. Бекетова С.С.Гребенчук.

Комісія провела роботу з визначення практичного впровадження результатів дисертаційної роботи Гребенчука С.С. на тему: **«Раціоналізація параметрів залізобетонних анізотропних оболонок»,** і встановила наступне:

1. **Розробка прийнята до впровадження** в листопад 2016р.

Архітектурно-будівельна система для зведення монолітних залізобетонних будівель і споруд із застосуванням вкладишів-порожнечеутворювачів, що не виймаються, з пінополістиролу або мінеральної вати не тільки в перекриттях, але і в інших елементах конструкції (фундаменти, колони, діафрагми жорсткості тощо).

Розроблені елементи виготовлені у вигляді оболонок нульової, позитивної і негативної гауссової кривизни (гіпар, нодоїд, плита, сфера і циліндр). Виконана критеріальна оптимізація конструктивного рішення.

2. **Характеристика результатів впровадження та оцінка**. Досліджена нова конструктивна система з ефективним поєднанням ресурсів, досліджені характеристики, матеріали та технологія. Конструктивна система, елементи якої виготовлені у вигляді оболонок нульової, позитивної і негативної гауссової кривизни (гіпар, нодоїд, плита, сфера і циліндр) створюють основу для формування конструкцій з наперед заданими позитивними властивостями.

3. **Висновки і пропозиції про подальше використання розробки.**

Нова конструктивна система з монолітного залізобетону, що дозволяє створювати багатоповерхові будівлі і споруди з довільною геометрією і практично необмеженим набором планувальних рішень. Будинки, виконані з елементів даної системи, на 35-45% легше будинків з суцільного монолітного залізобетону. Останнє характеризує ці споруди як екологічно позитивні.

Впровадження результатів дисертаційної роботи здійснено при проектуванні готелю по вулиці Пілота Нестерова в м.Харкові, з вільним плануванням приміщень, великими прольотами і необхідною висотою.

М.О.. Мєлєнцов

О.В. Колупаєв

В.С. Шмуклер

Л.В. Гапонова

С.С. Гребенчук

ДОДАТОК Б. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Гапонова, Л.В. Рішення температурної задачі для неоднорідної багатошарової конструкції / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць «Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві». – ЛНТУ. – 2016. – Вип. 5. – С. 199-214.

2. Гапонова, Л.В. Оценка огнестойкости конструктивно-анизотропной железобетонной плиты / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, С.С. Гребенчук // Міжвідомч. наук.-техн. зб. (технічні науки) «Будівельне виробництво». – Київ, 2017. – № 62/1. – С. 57-63.

Міжнародні публікації або у збірниках, що входять до міжнародних наукометричних баз:

3. Гапонова, Л.В. Експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованого стану сферичної оболонки покриття /Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 157. – С. 102-113.

4. Gaponova L.V. Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell / L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk // Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering / Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University – 1(48)` 2017. – С.108-120.

5. Гапонова, Л.В. Обследование и анализ архитектурно-конструктивных особенностей памятника архитектуры в городе Харькове / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук, А.С. Константинов, Д.В. Чибаров // НВБ, 2017. – Т. 88. – № 2. – С. 124-131.

6. Гапонова, Л.В. Напряженно-деформируемое состояние архитектурно-композиционного комплекса в форме ленты Мебиуса / Л.В. Гапонова, П.А.

Резник, О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 229-237.

Колективна монографія:

7. Гапонова, Л.В. Архитектурно-композиционный комплекс в форме ленты Мебиуса // Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А Калмыков, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 337-350.

Публікації апробаційного характеру:

8. Гребенчук, С.С. Теплоаккумулирующие ограждающие конструкции // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» ХНУМГ імені О.М. Бекетова м. Харків, 23 жовтня – 22 листопада 2013 р. – С.202-203.

9. Babaev, V. N. Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell / V.N. Babaev, V.S. Shmukler, S.H. Feirushah, L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk, O.A. Kalmikov // 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. – Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, 2016. – Iraq. p. 42-49.

10. Oleg Kalmykov. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July 2017.

11. Oleg Kalmykov. Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July

2017.

Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:

12. Гапонова, Л.В. Напружено-деформований стан циліндричної оболонки / Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – Вип. 126. – С. 9-18.

13. Гребенчук, С.С. Экспериментальные исследования железобетонных анизотропных оболочек / Гребенчук С.С. // Журнал «Бетон и железобетон в Украине». – Полтава, 2017. – С. 18-26.

14. Емельянова, И.А. Технологические особенности возведения сооружений криволинейной формы по строительной системе «Монофант» с использованием малогабаритного оборудования способом мокрого торкретирования / И.А. Емельянова, С.А. Гузенко, Д.О. Чайка, С.А. Бугаевский, Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 323-330.

Патенти:

15. Пат. 113750 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. Стенд для натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер,С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № u 201608761; заявл.12.08.16; опубл. 10.02.17. Бюл. № 3.

16. Пат. 115153 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. – Спосіб натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № u 201608763; заявл. 12.08.16, опубл. 10.04. 17, бюл. № 7/2017.

Апробація результатів дисертації:

1. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» ХНУМГ імені О.М. Бекетова, м. Харків, 23 жовтня – 22 листопада 2013 р. (особиста участь);

2. VI науково-практична конференція «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві» (м. Харків, 23-24 березня 2016 р.);

3. Міжнародна науково-технічна конференція «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація», м. Полтава, 4-5 квітня 2016 р.(особиста участь);

4. 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016, (April 12–14, 2016) Salahaddin University-Erbil, Kurdistan, Iraq(заочна участь);

5. I Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні», м. Харків, 6-7 квітня 2017 р., (особиста участь);

6. II Міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні технології в будівництві», м. Київ, 6-7 квітня 2017 р.,(заочна участь);

7. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті», м. Харків, 19-21 квітня 2017 р., (особиста участь).

ДОДАТОК В.ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПОТЕНЦІЙНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЕФОРМАЦІЇ

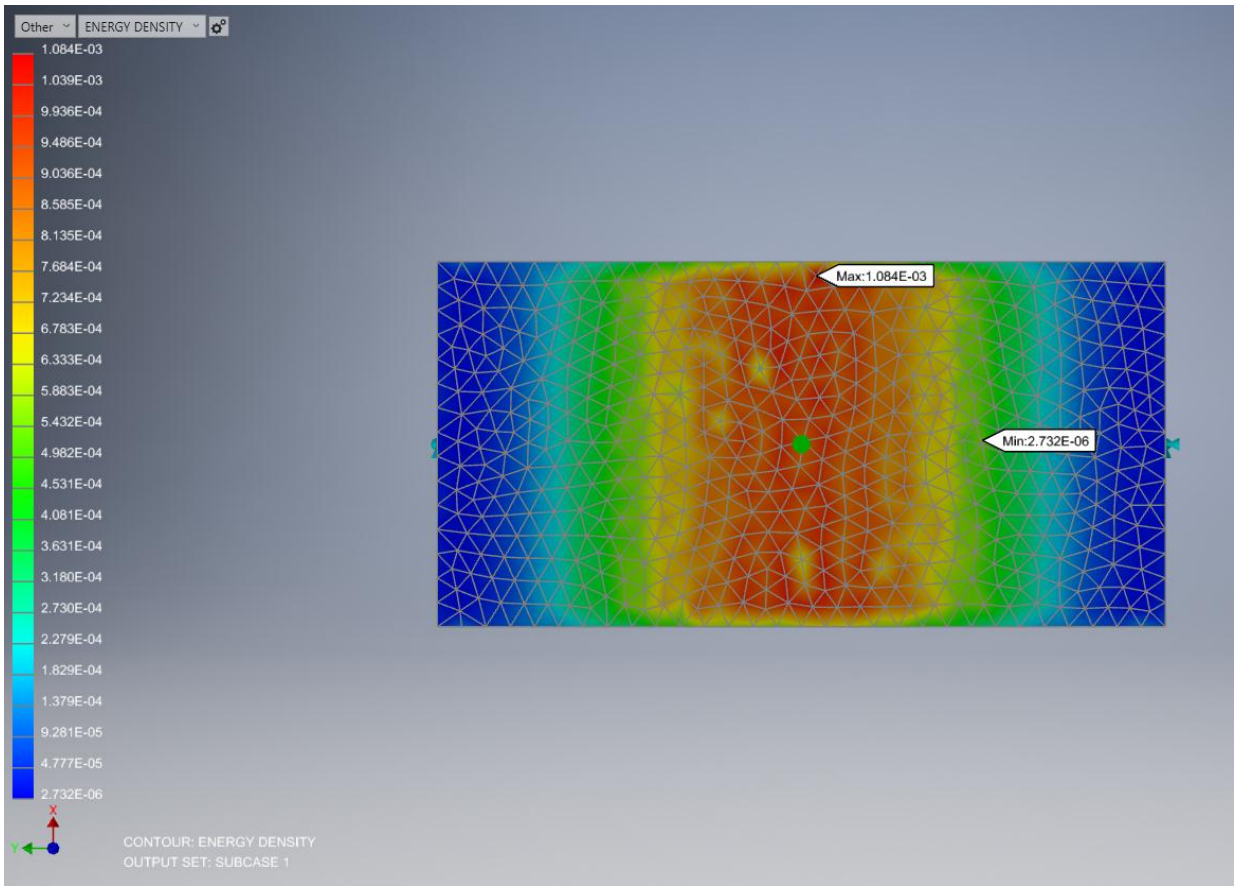


Рис. В 1. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм х0,1

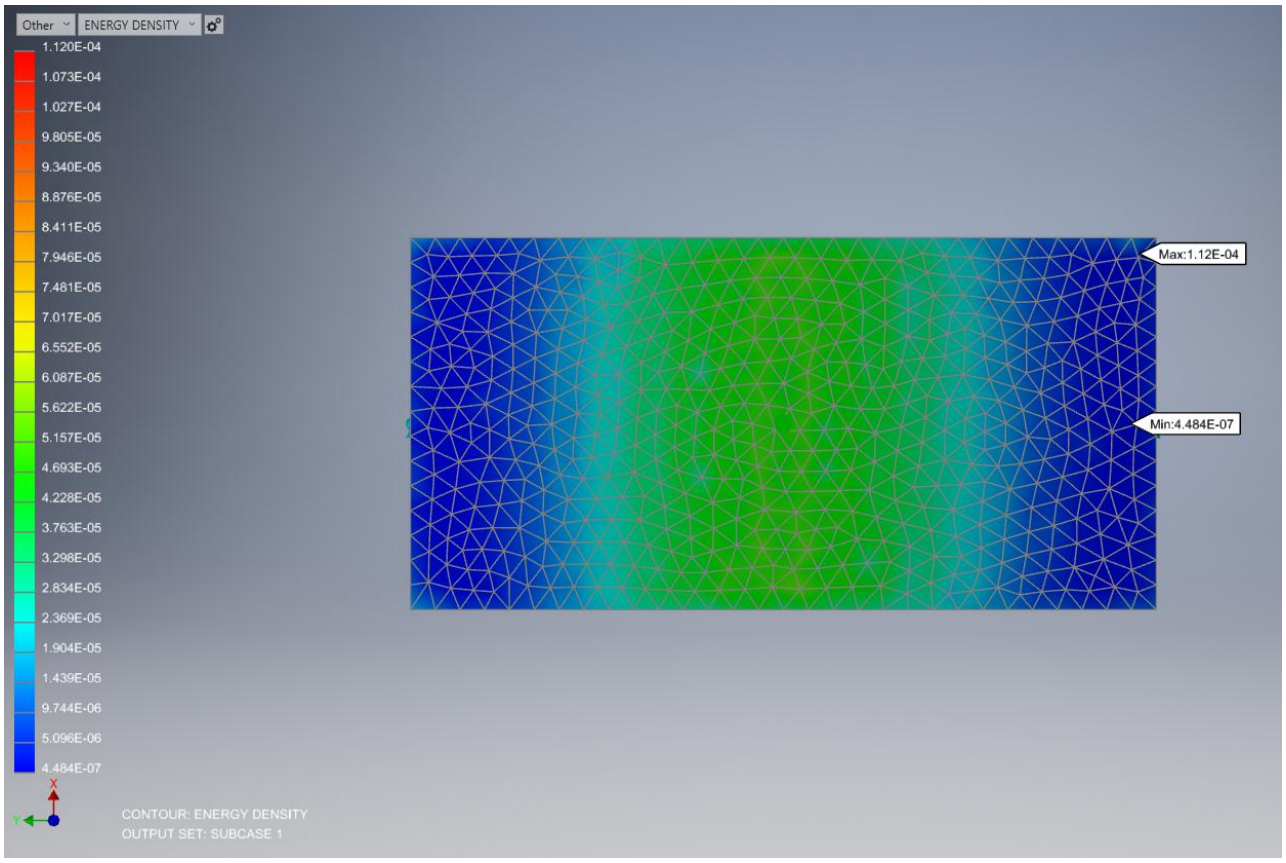


Рис. В 2. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 1000 мм

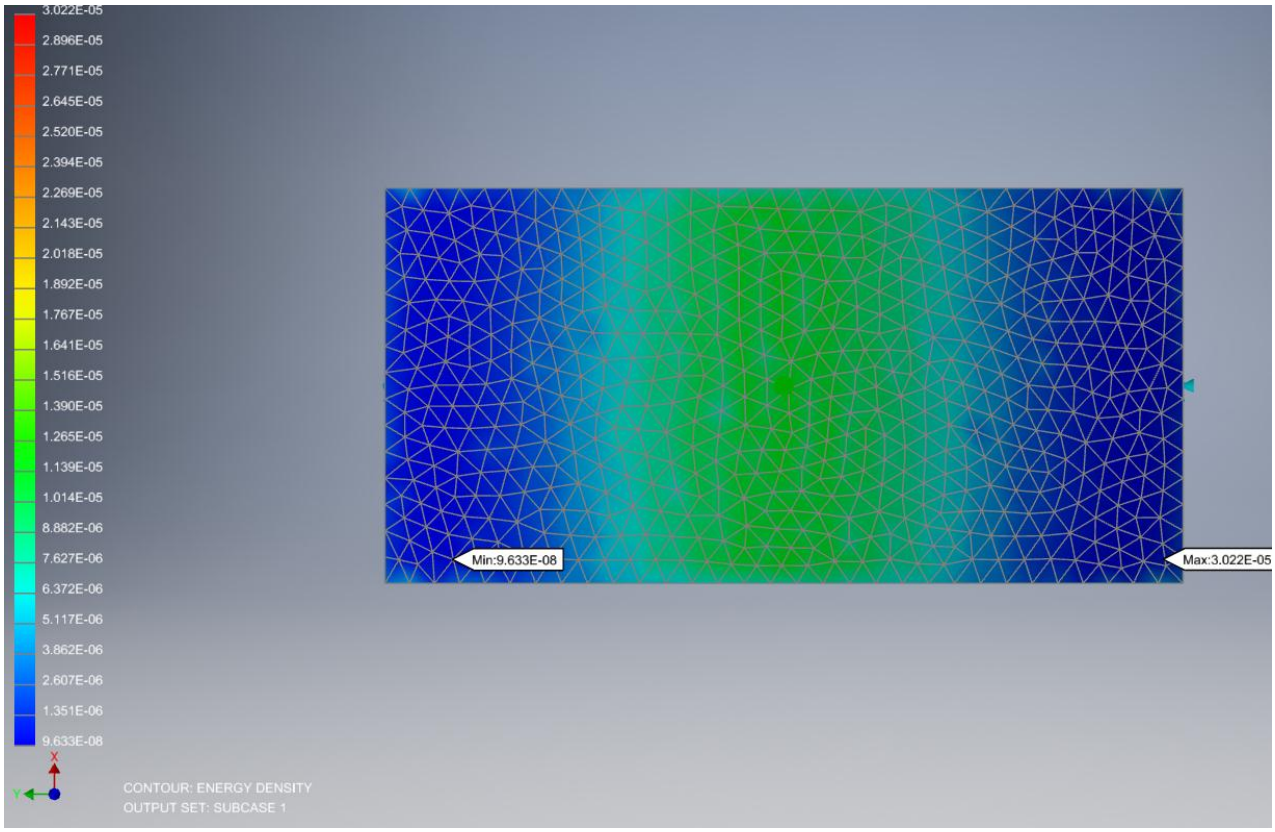


Рис. В.3. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2000 мм

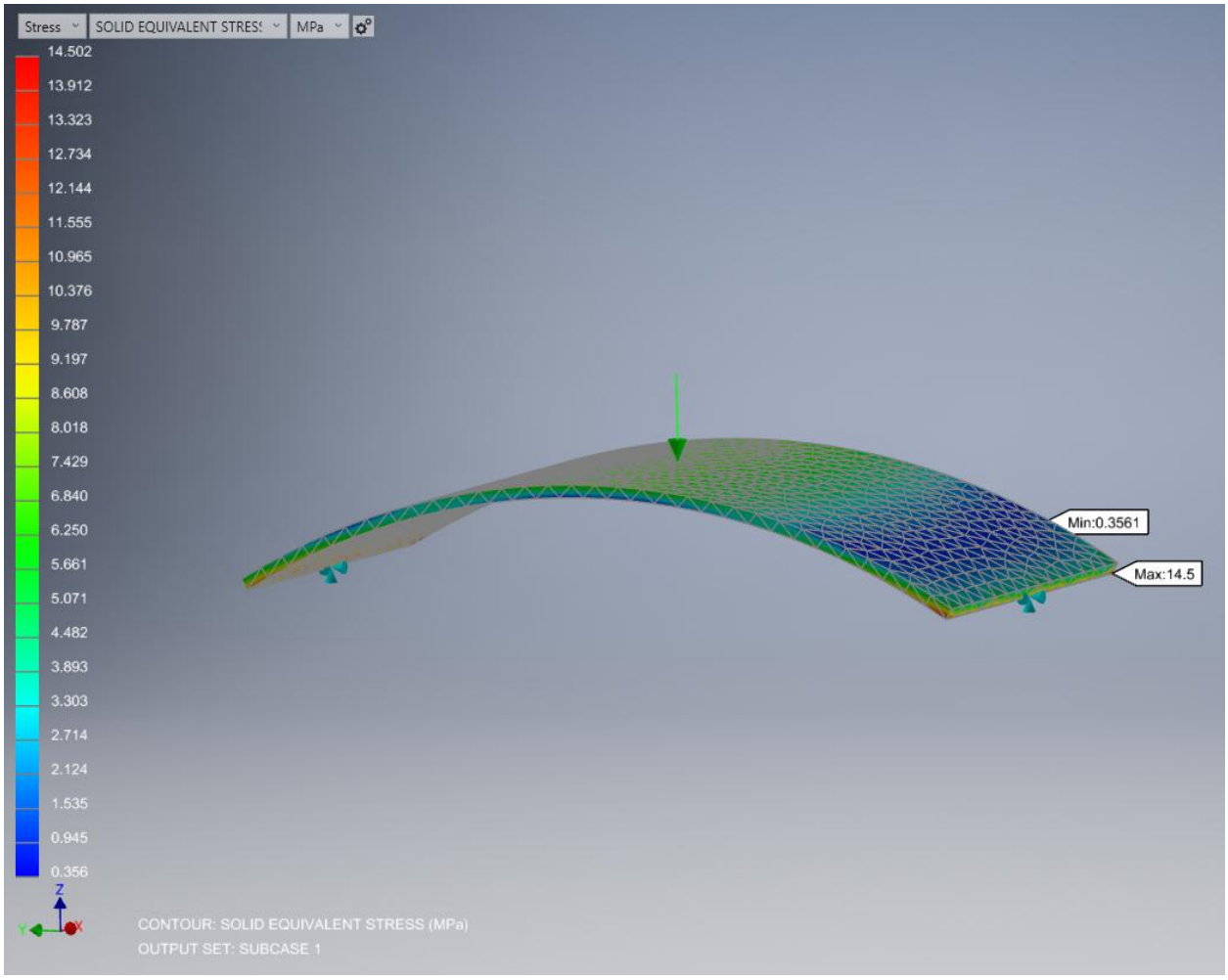


Рис. В.4. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2800 мм від максимального навантаження

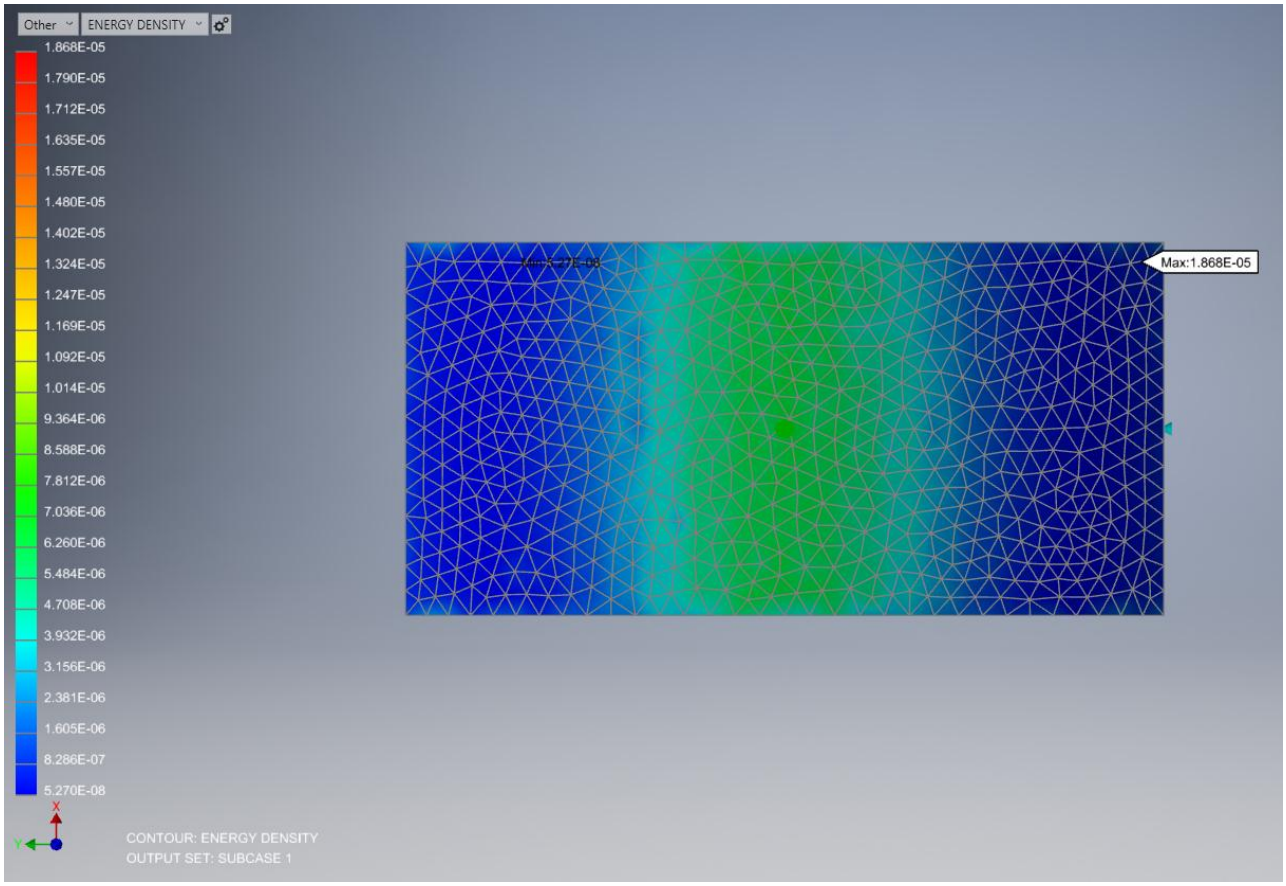


Рис. В.5. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 3000 мм

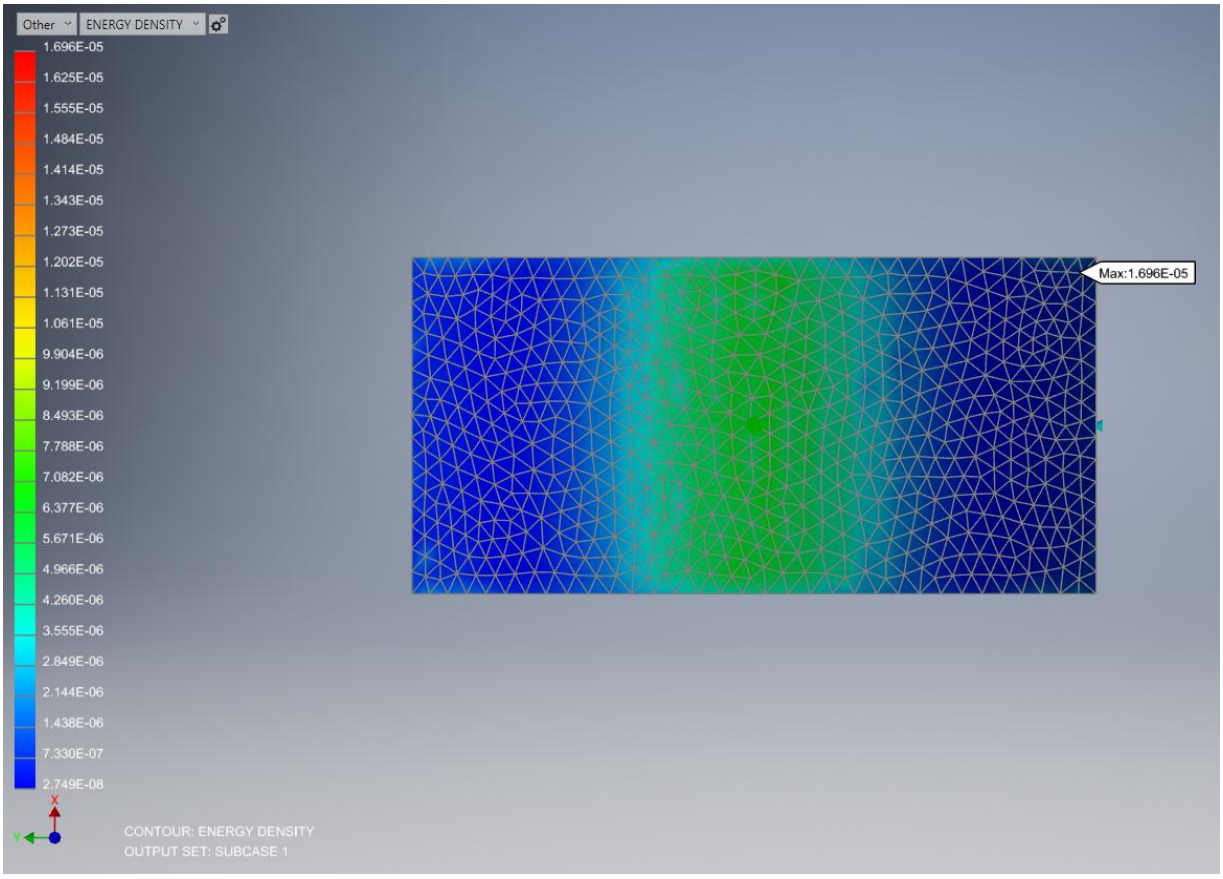


Рис. В.6. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 3500 мм

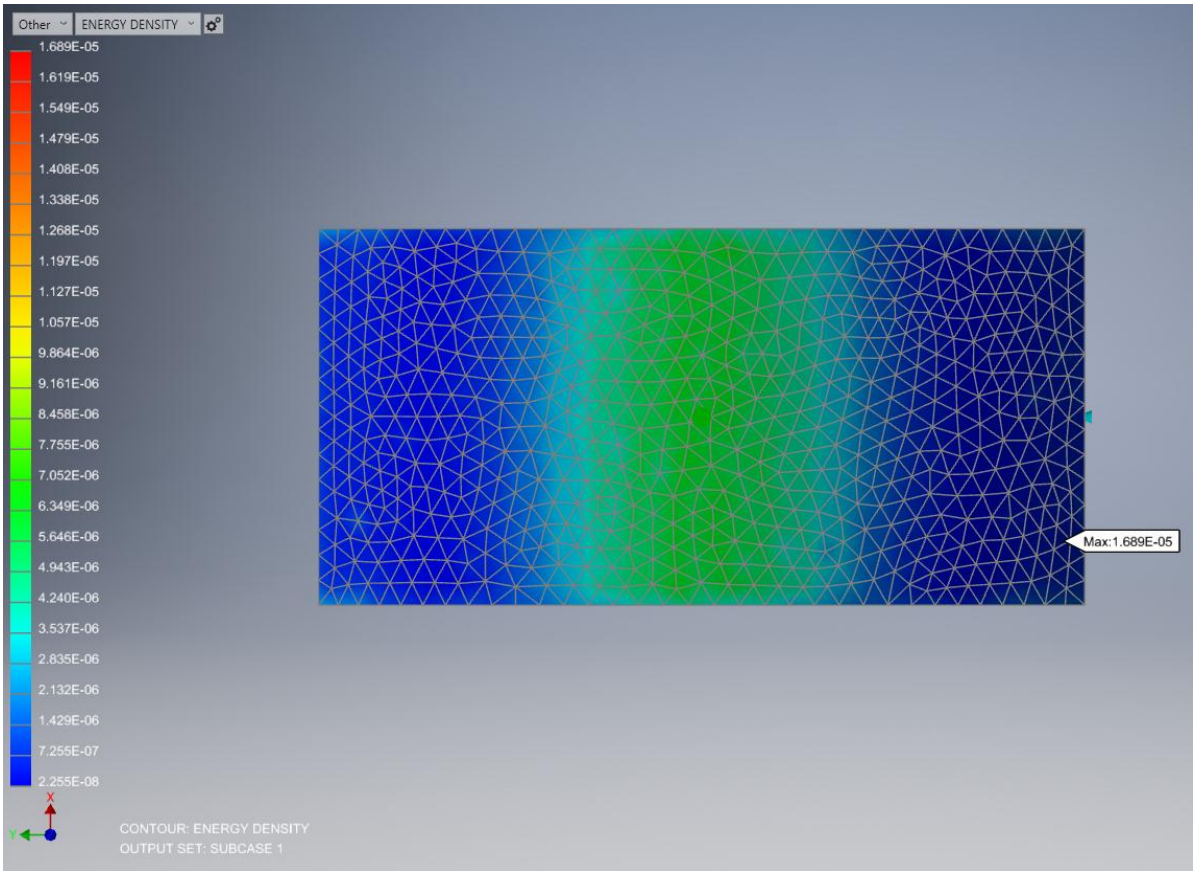


Рис. В.7. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 3600 мм

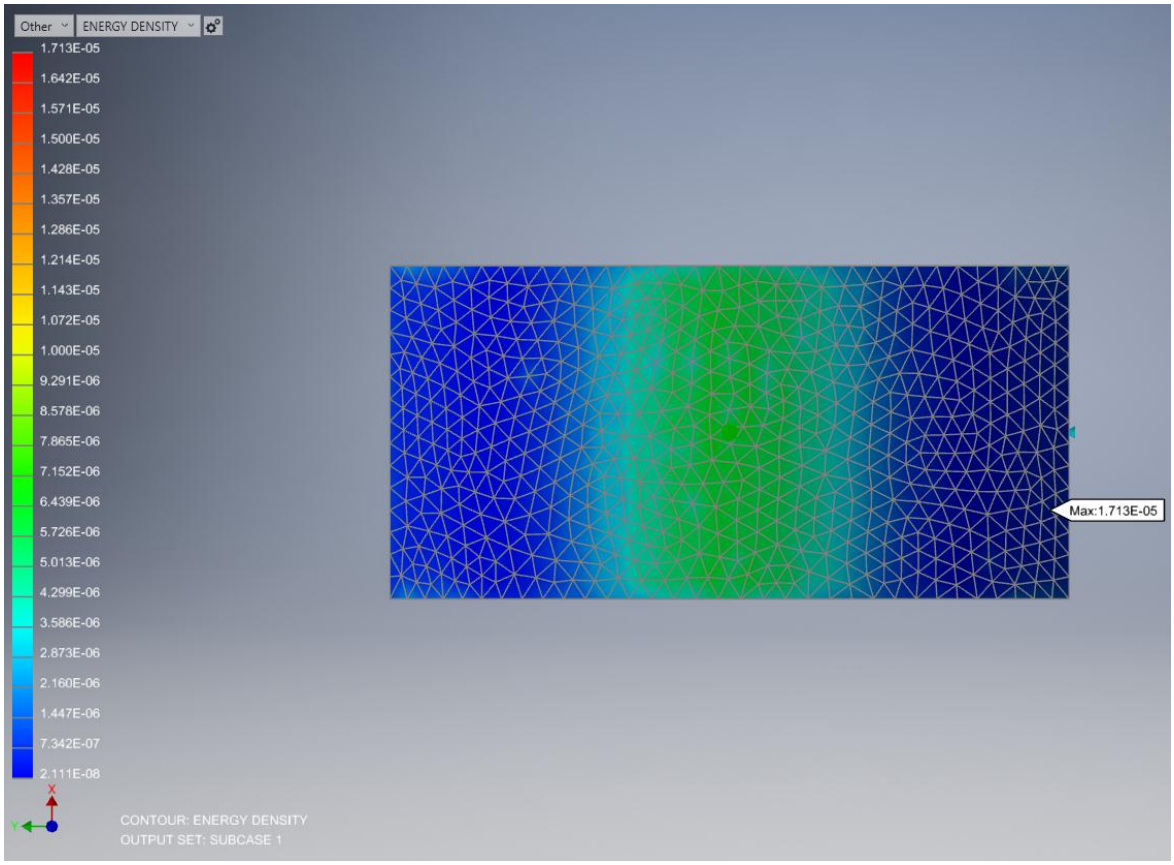


Рис. В.8. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 3700 мм

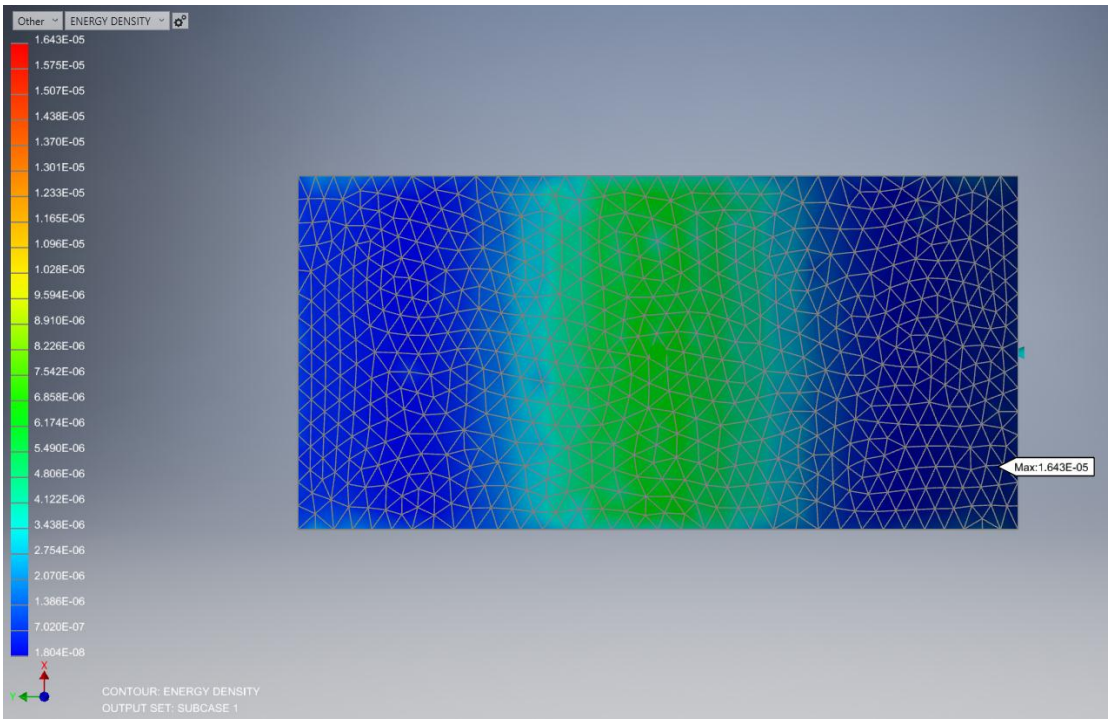


Рис. В.9. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 3800 мм

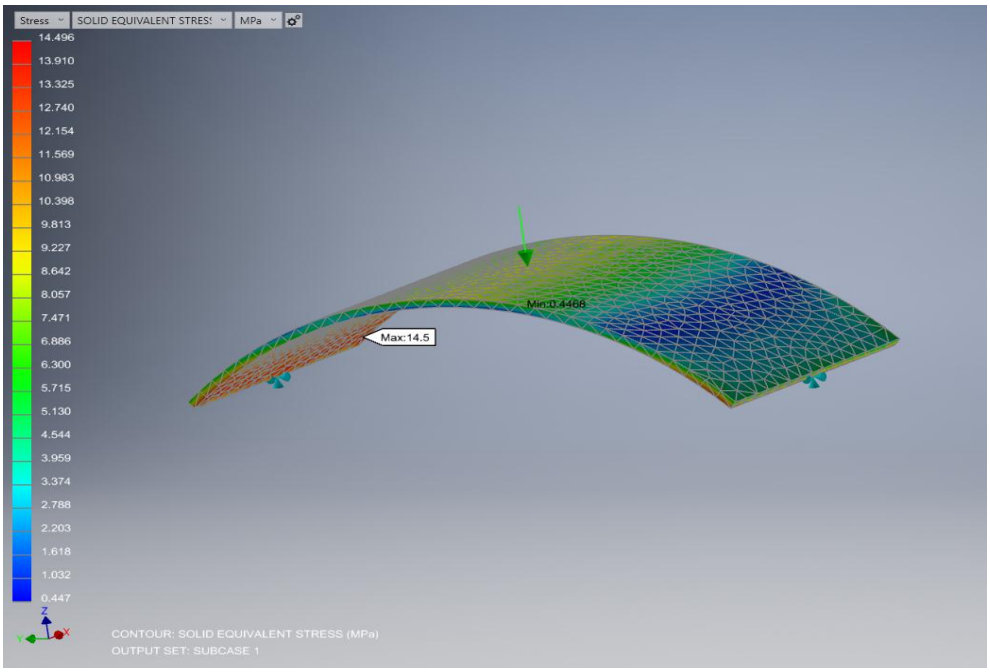


Рис.В.10. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 3800 мм від максимального навантаження

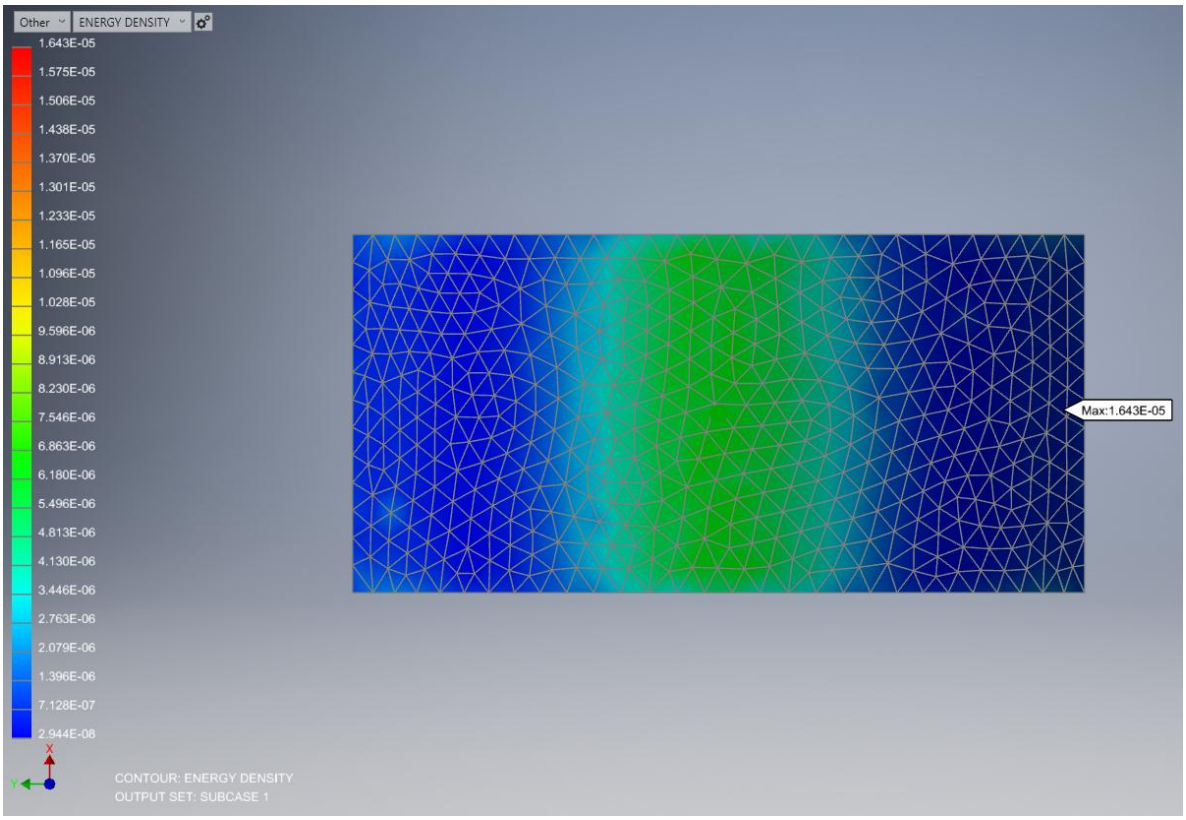


Рис. В.11. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 4000 мм

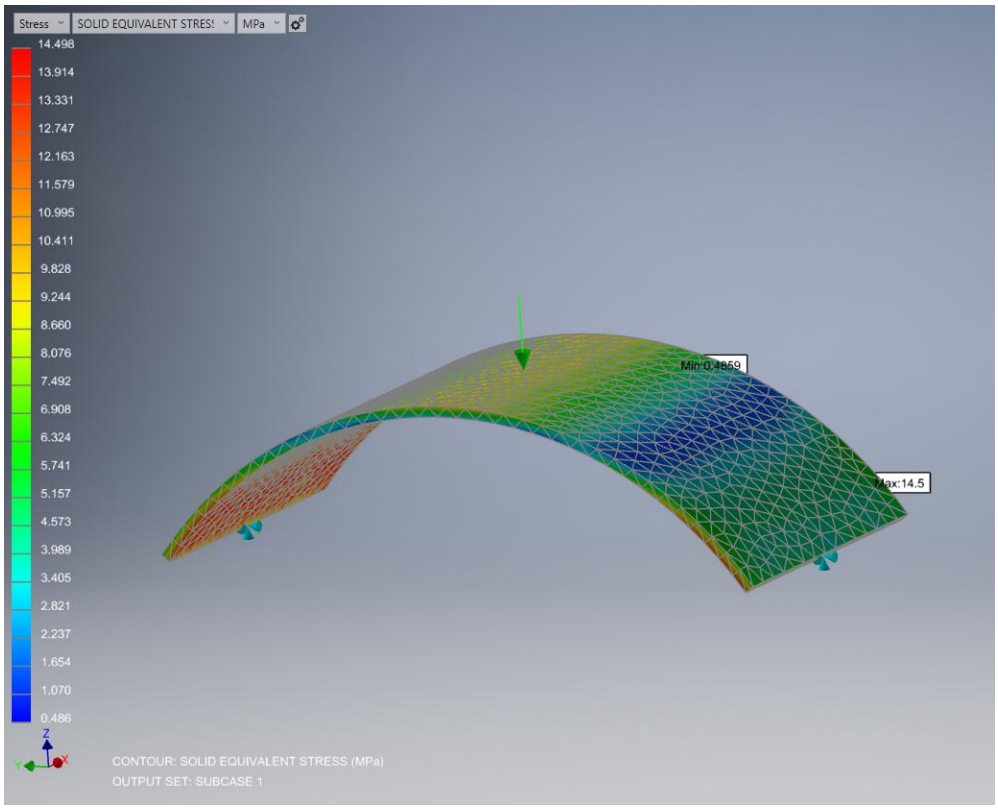


Рис. В. 12. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 4800 мм від максимального навантаження

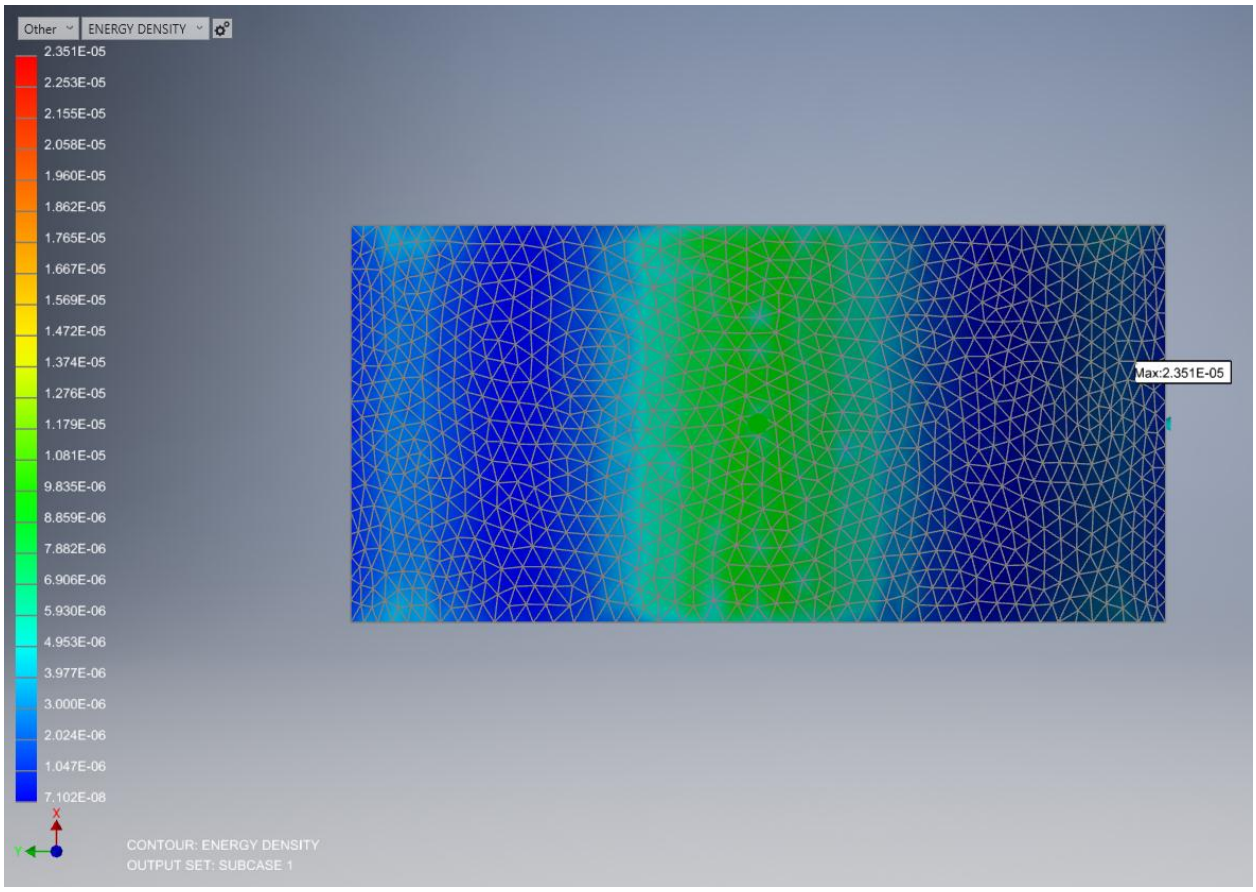


Рис. В.13. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 5000 мм

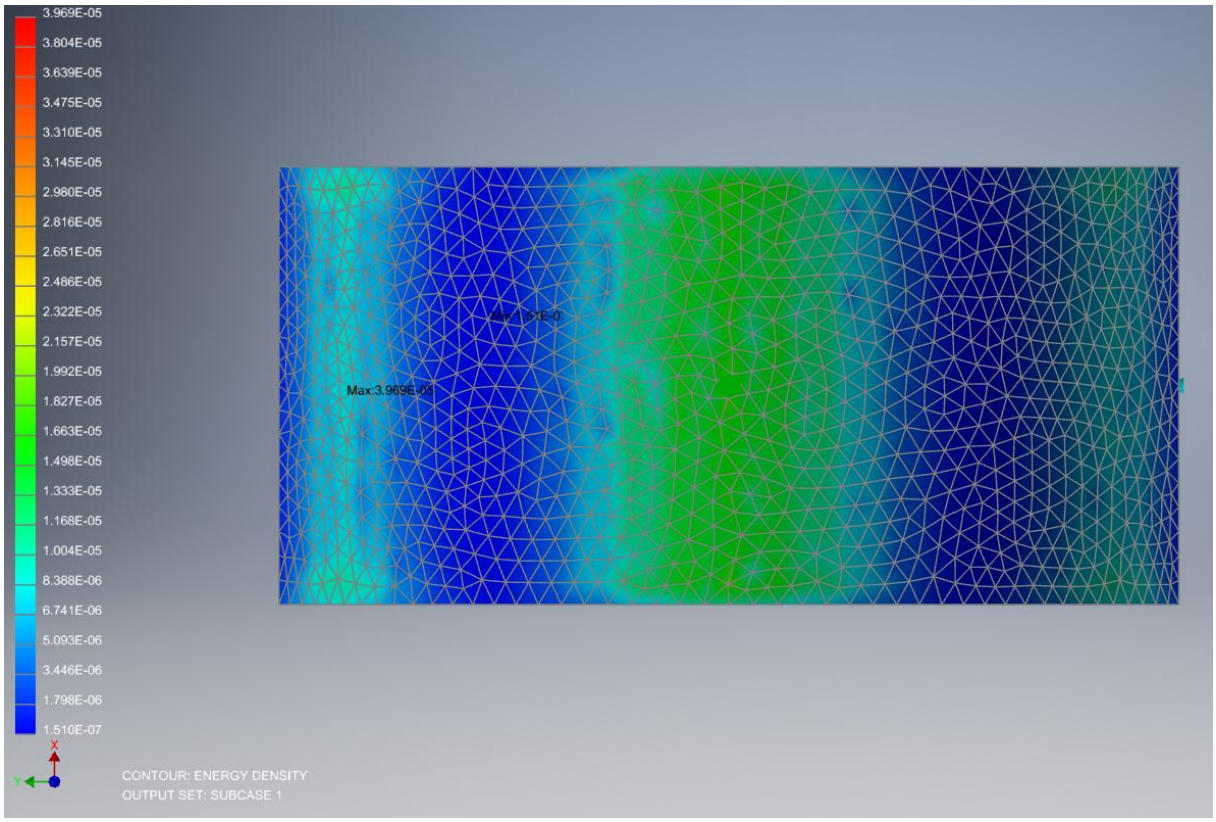


Рис. В.14. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 6000 мм.

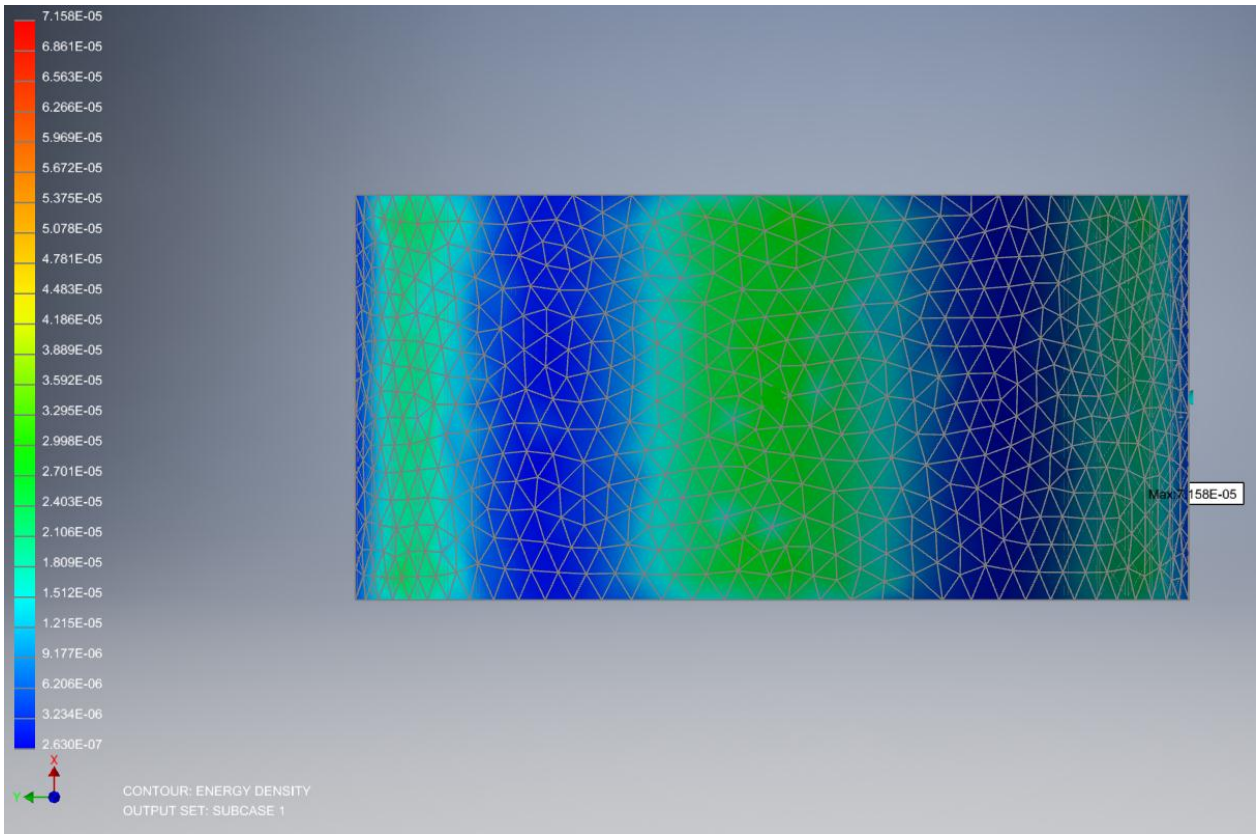


Рис. В.15. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 7000 мм

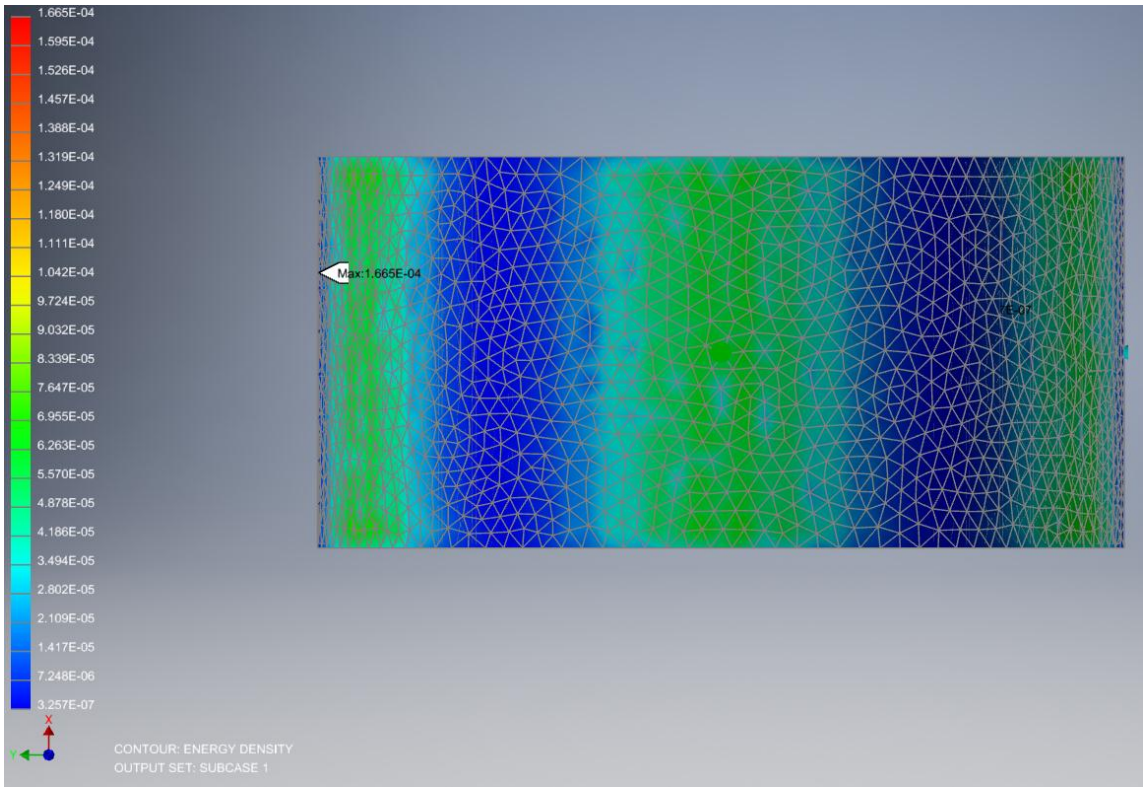


Рис. В.16. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 8000 мм

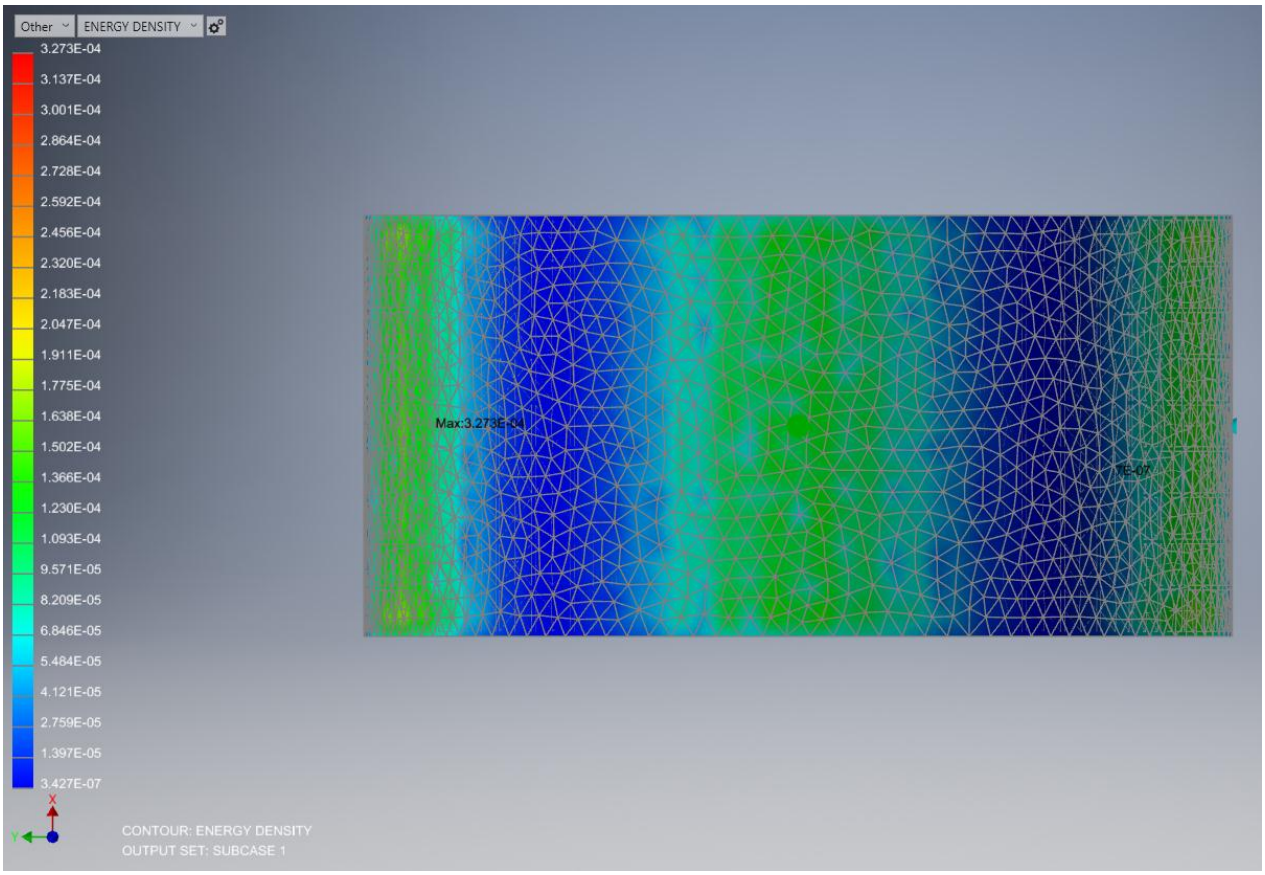


Рис. В.17. Щільність потенційної енергії оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 9000 мм

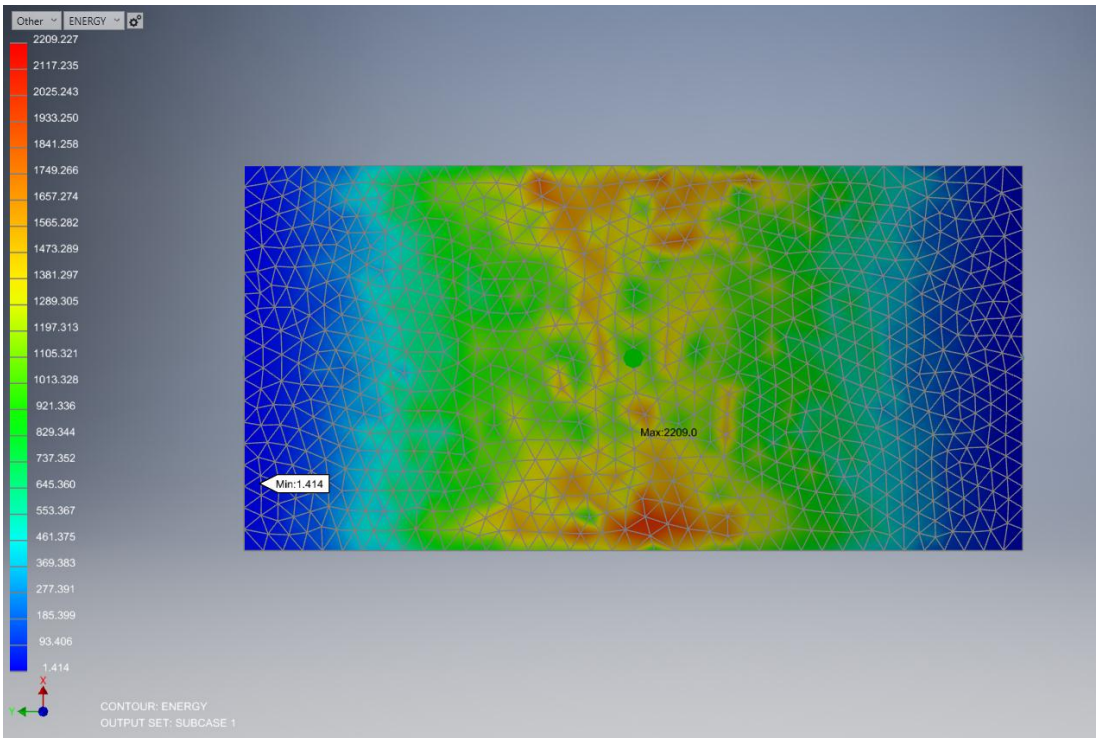


Рис. В.18. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 500 мм і товщиною ребра 50 мм.

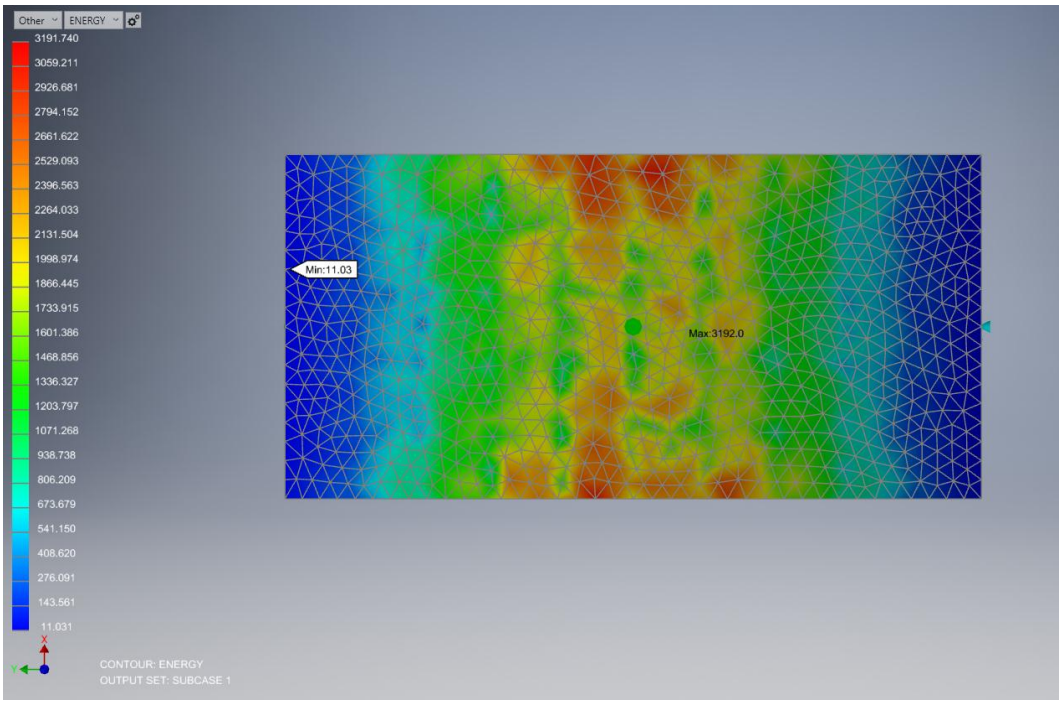


Рис. В.19. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 2000 мм і товщиною ребра 166,9 мм.

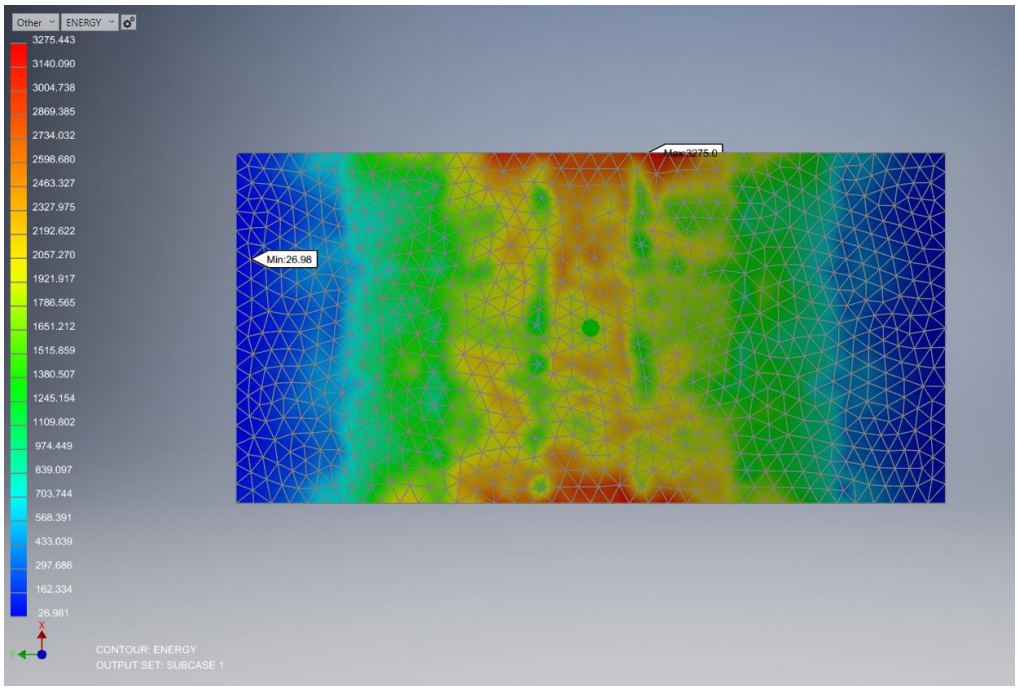


Рис. В.20. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 2000 мм і товщиною ребра 241,1 мм.

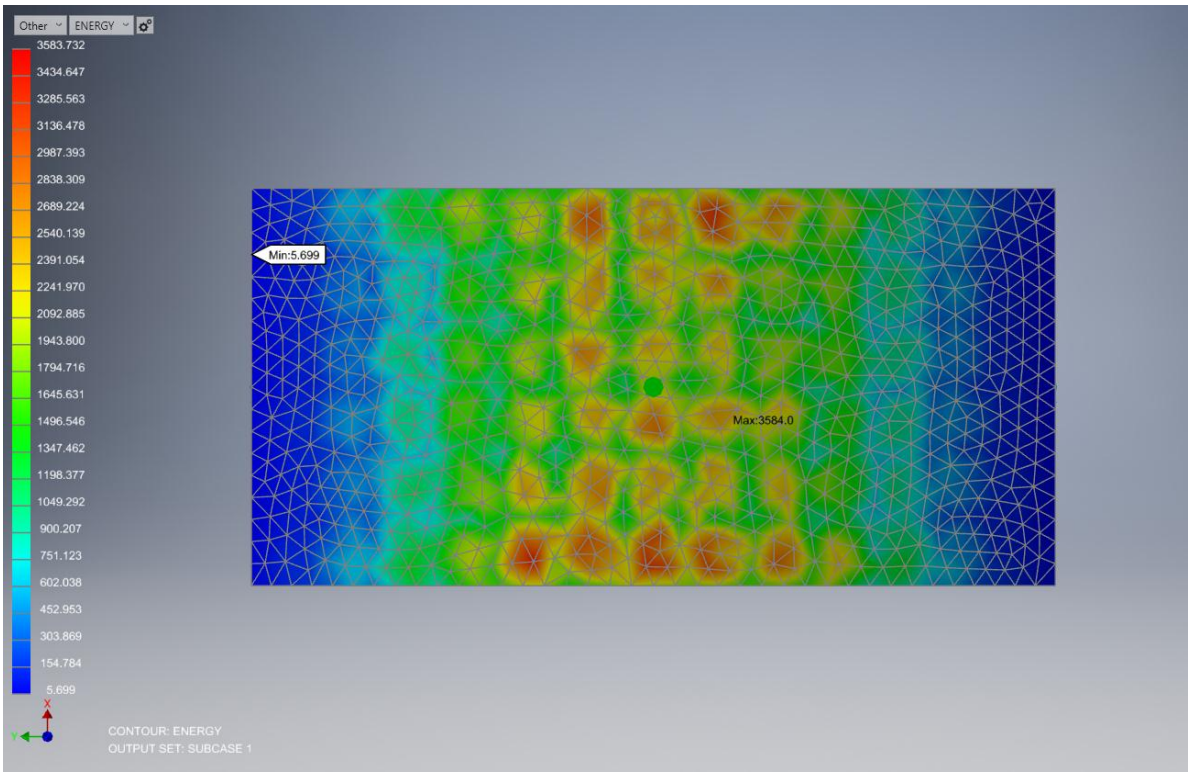


Рис. В.21. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 1500 мм і товщиною ребра 137,7 мм.

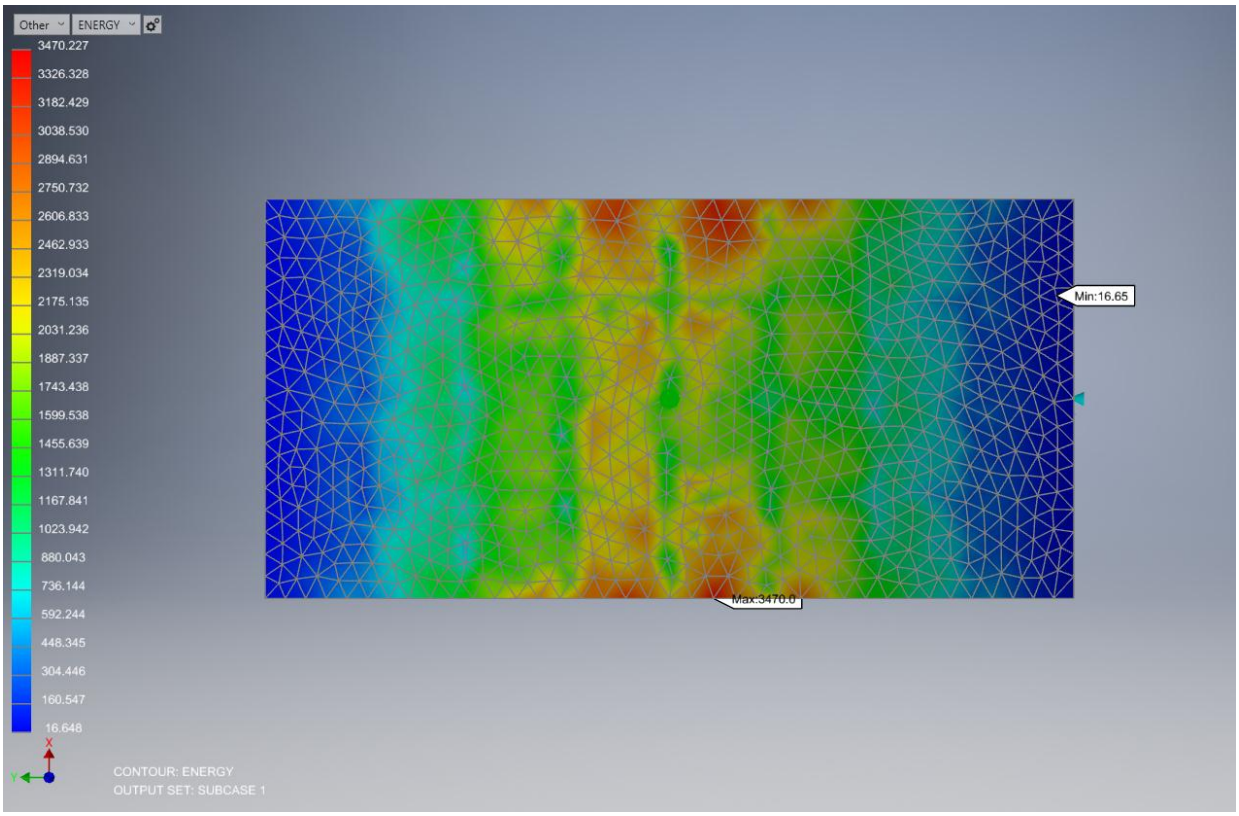


Рис. В.22. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 2500 мм і товщиною ребра 207,3 мм.

ДОДАТОК С. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

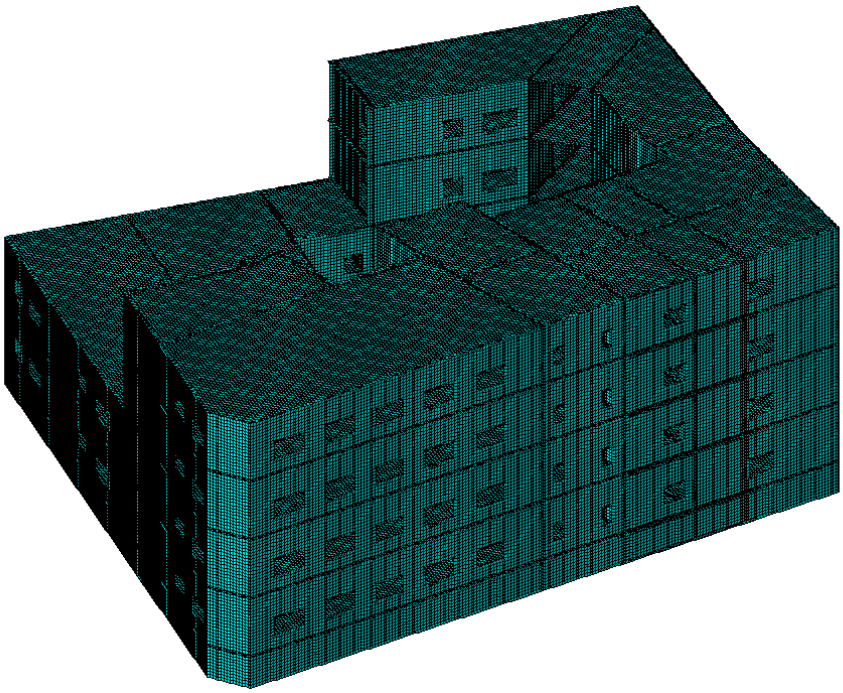


Рисунок С.1. Просторова СЕ модель будівлі

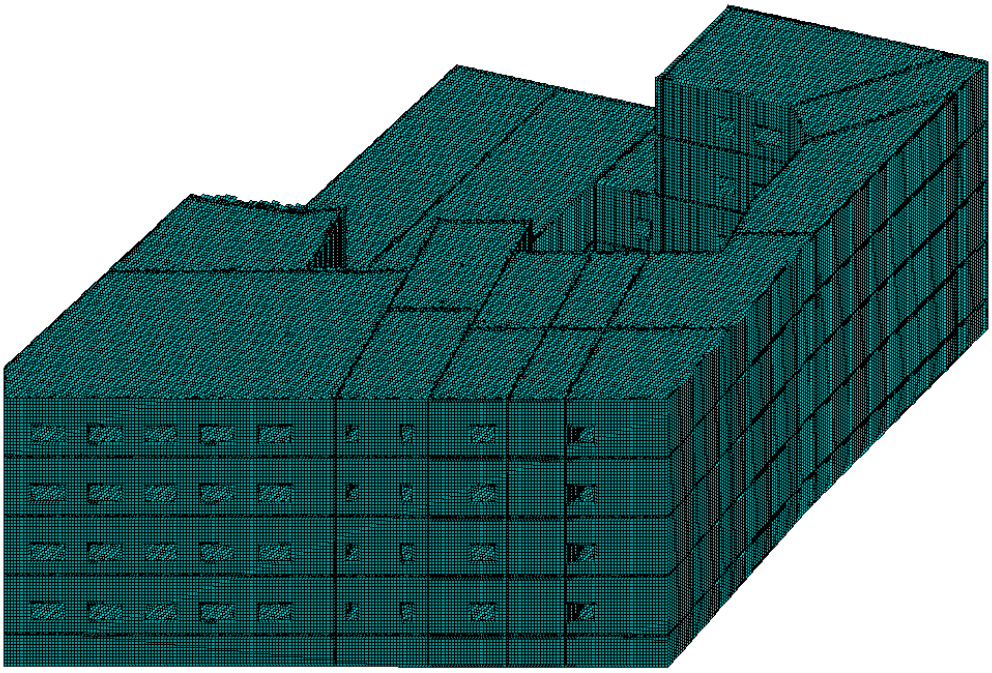


Рисунок С.2. Просторова СЕ модель будівлі

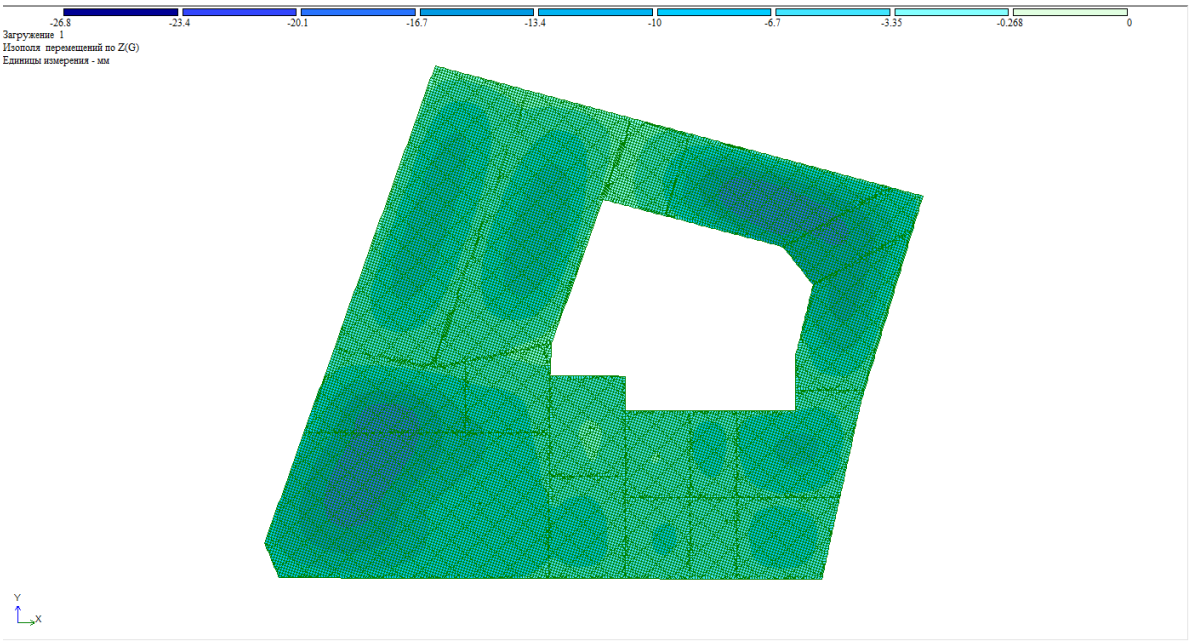


Рисунок. С.3.. Ізополя переміщень плити перекриття, тм

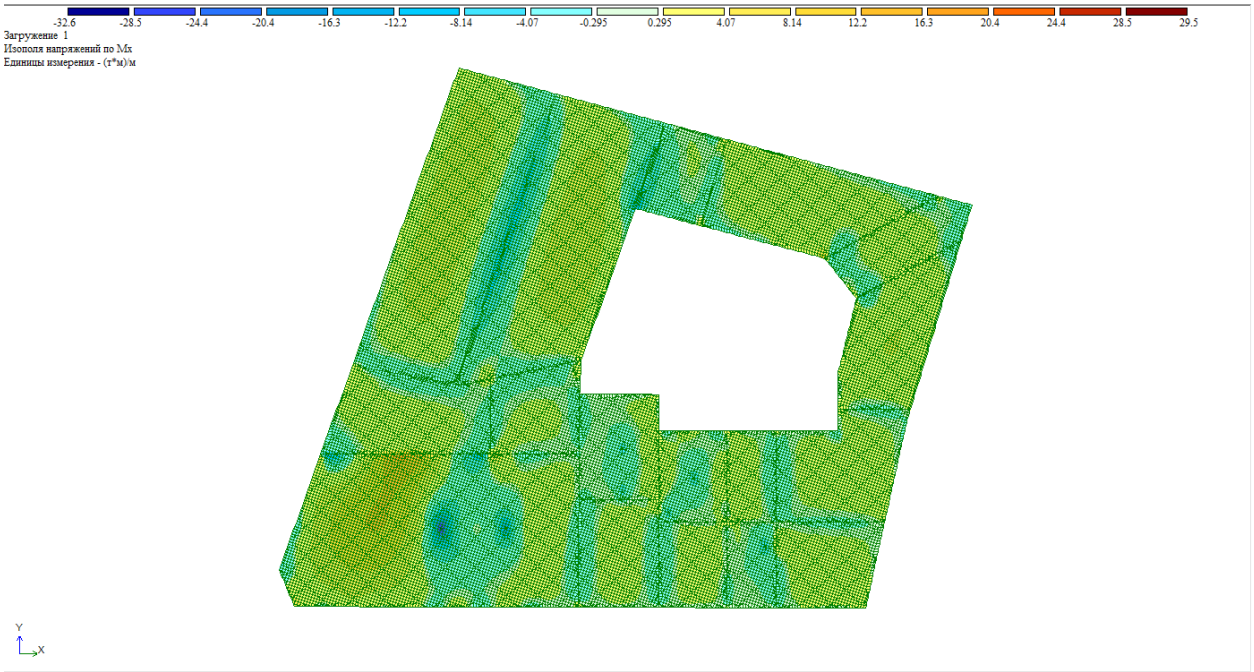


Рисунок С.4. Ізополя моментів Мх плити перекриття, тм

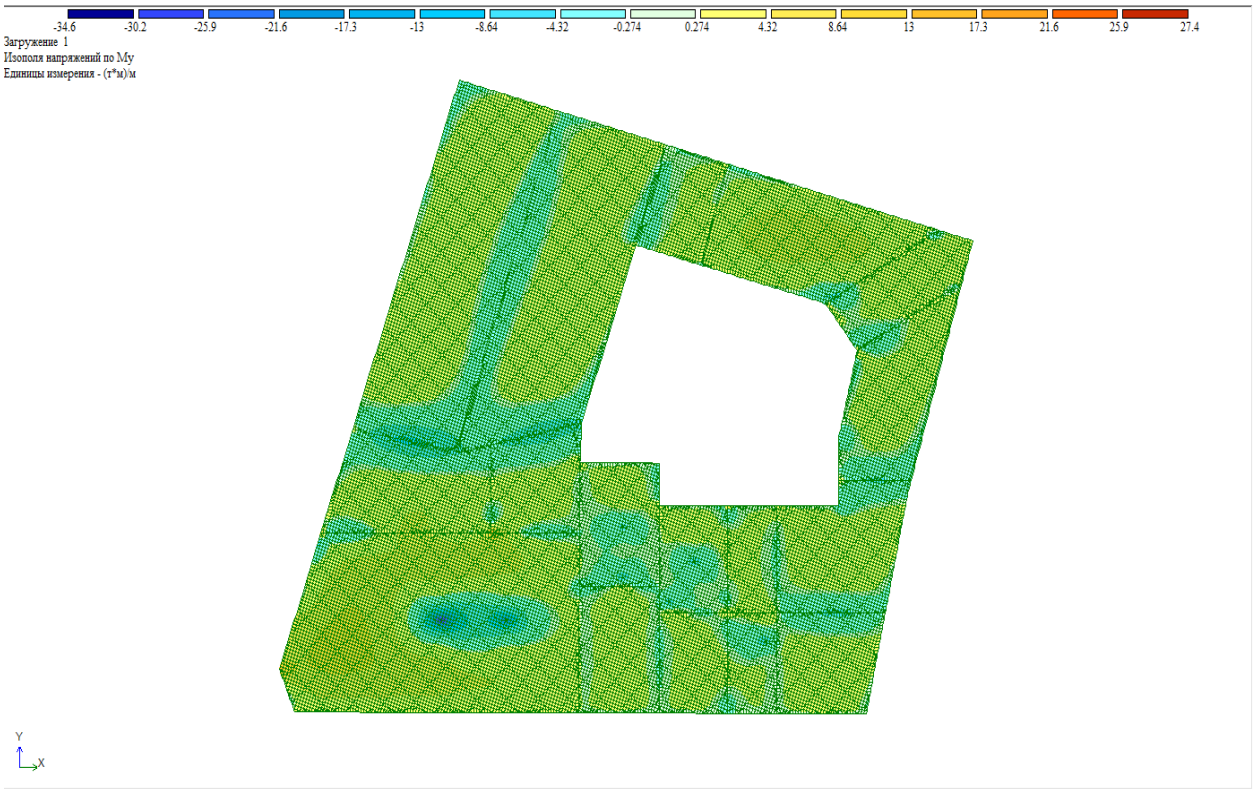


Рисунок С.5. Ізополя моментів My плити перекриття, тм

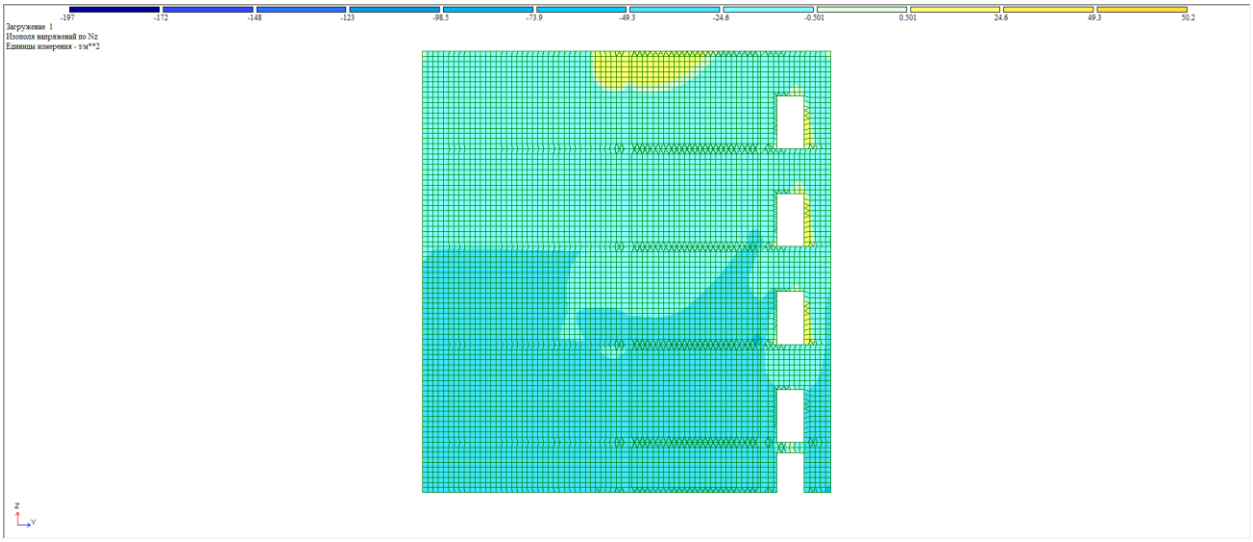


Рисунок С.6. Ізополя поздовжніх напружень Nz, т/м^2

ДОДАТОК Д. ДОВІДКА О ЛІЦЕНЗІЇ НА ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОПМЛЕКСА «ANSYS»

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
"УКРГІДРОПРОЕКТ"

UKRHYDROPROJECT
PUBLIC JOINT-STOCK COMPANY

61166, Україна, м. Харків, пр. Науки, 9
Телефон +38 (057) 717-57-05
Факс +38 (057) 719-47-30
E-mail water@uhp.kharkov.ua
http www.uhp.kharkov.ua

9 Nauky Avenue, Kharkiv, 61166 Ukraine
Telephone +38 (057) 717-57-05
Fax +38 (057) 719-47-30
E-mail water@uhp.kharkov.ua
http www.uhp.kharkov.ua

Проректору з наукової роботи
Харківського національного
університету міського господарства
імені О.М. Бекетова
професору М.К. Сухонос

23.10.2017 № Р-599
На № 2079 від 20.10.17

Шановна Марія Костянтинівна!

ПАТ «Укргідропроект» не заперечує проти використання здобувачем Вашого Університету Гребенчуком Сергійом Сергійовичем наявного у нас програмного комплексу «ANSYS» (ліцензія № 01008608) для проведення ним перевірочних чисельних розрахунків по дисертаційній роботі.

Заступник генерального директора,
професор О.І. Вайнберг

ПРОЕКТНО-ІНЖИНІРИНГОВИЙ КОМПЛЕКС "ГРАНТ"
ТОВ "ГІДРОТЕХПРОЕКТ"
ПАТ "УКРГІДРОПРОЕКТ"
ТОВ "УКРАТОМЕНЕРГОПРОЕКТ"
ТОВ "МІЖВІДОМЧИЙ ЦЕНТР ІНЖЕНЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ"

000002086

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова
61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17,
тел. (057)706-15-37, факс (057) 706-15-54
E-mail: rectorat@kname.edu.ua,
код ЄДРПОУ 02071151

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
O.M. BEKETOV NATIONAL UNIVERSITY OF URBAN ECONOMY IN KHARKIV
17, Marshala Bazhanova Street, Kharkiv 61002,
tel. (057) 706-15-37, fax (057) 706-15-54
E-mail: rectorat@kname.edu.ua,
EDRPOU code 02071151

Від 20.10.17 № 2079

На № _____ від _____

Заступнику генерального директора
ПАТ «Укргідропроект»
д.т.н., профессору О.І. Вайнбергу

Шановний Олександре Ісааковичу!

Просимо Вас дозволити здобувачу кафедри будівельних конструкцій Гребенчуку Сергію Сергійовичу виконати перевірочні чисельні розрахунки у наявному у Вашій організації програмному комплексі «ANSYS» при проведенні теоретичних досліджень дисертаційної роботи.

Проректор з наукової роботи,
професор М.К. Сухонос

Виконавець:
канд.техн. наук, доцент
Гапонова Людмила Вікторівна,
тел. (066)-366-00-57

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "УКРГІДРОПРОЕКТ"
Вхід.№ 737
23 10 2017 р.