

Машини нафтової та газової промисловості

УДК 622.2

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-20(76)-310-319

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ФУНДАМЕНТУ

**О. Я. Фафлей, А. В. Рус, І. Р. Мацьків, А. В. Андрусак,
Д. Р. Дейнега, В. В. Михайлюк**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. 0966587275, e-mail: oleh.faflei@nung.edu.ua*

Основою будівництва є фундамент. На даний час розроблено різноманітні типи фундаментів і способи їх зведення. Сучасне будівництво стикається з ускладненими геологічними умовами та обмеженням простору забудови, що вимагає використання новітніх технологій влаштування фундаментів. На заміну існуючим бетонним фундаментам глибокого залягання широкого розповсюдження набуває фундамент Pin Pile – який є перспективною альтернативою, особливо у випадках, коли застосування важкої техніки для доставки матеріалів та спорудження традиційних фундаментів є неможливим або економічно недоцільним. Проте необхідним стає вивчення та дослідження перспективних фундаментів Pin Pile з метою їх адаптації до конкретних експлуатаційних умов. Для цього доцільно застосовувати імітаційне моделювання, яке базується на методі скінченних елементів. Для встановлення характеристик фундаменту, який споруджується за технологією Pin Pile, побудовано його тривимірну модель. Для спрощення імітаційного моделювання скореговано розрахункову схему та взаємозв'язки елементів конструкції. У результаті імітаційного моделювання отримано розподіли еквівалентних напружень та переміщень у досліджуваній моделі фундаменту. Відповідно до розподілу еквівалентних напружень максимальні їх величини концентруються в палях на виході з труб бетонної головки. Це пояснюється граничними умовами та принципом роботи фундаменту. Максимальна величина еквівалентних напружень складає 53 МПа, що для вибраного матеріалу досліджуваних паль не є критичним. Щодо переміщень, які спостерігають-

ся у досліджуваній моделі фундаменту, то максимальна їх величина складає 0,4 мм. Також визначено величину контактного тиску на поверхнях «палі-труба». Максимальна величина цього тиску становить 6,5 МПа, що, зважаючи на властивості матеріалів, з яких виготовлено труби та палі, є прийнятним. В подальших дослідженнях планується встановити вплив властивостей ґрунту на напружено-деформований стан фундаменту та провести його вдосконалення з метою підвищення експлуатаційних характеристик. Також при цьому буде враховано коефіцієнт тертя між елементами фундаменту та ґрунтом.

Ключові слова: фундамент, властивості ґрунту, нафтогазове обладнання, імітаційне моделювання, фундамент Pin Pile, напруження, деформація.

Вступ

Спорудження фундаментів як у сучасному будівництві, так і для нафтогазових машин та обладнання є іноді ускладненим через необхідність забезпечення високих вимог надійності та довговічності у складних геологічних та кліматичних умовах [1-3]. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні та дослідженні новітніх фундаментів [4]. Серед перспективних є фундамент Pin Pile, що відзначається високою адаптивністю та ефективністю в складних умовах експлуатації. Фундамент Pin Pile чинить мінімальний вплив на навколишнє середовище, має високу несучу здатність при невеликих розмірах [5].

Одним з ключових інструментів для вивчення поведінки таких фундаментів є імітаційне моделювання, яке дозволяє аналізувати фізико-механічні процеси без необхідності проведення повномасштабних експериментів. Застосування сучасних програмних засобів моделювання дає змогу детально дослідити взаємодію елементів фундаменту з ґрунтом, оцінити розподіл напружень, деформації та інші критично важливі параметри.

Аналіз вітчизняних досліджень і публікацій

Великогабаритні та дуже відповідальні нафтогазові машини і обладнання (наприклад, верстати-качалки, резервуари, сепаратори) тощо встановлюються на фундаментах, які споруджують на ґрунтах різної щільності. Проте просідання фундаментів на ґрунтах з низькою несучою здатністю спричиняє появу складних екстремальних ситуацій. Так, наприклад, просідання фундаменту верстата-качалки в першу чергу призводить до зміщення головки балансира відносно осі устьового сальника, і як наслідок, до пришвидшеного його зносу та передчасного виходу з ладу [6].

Якщо розглядати окремо вертикальні резервуари для зберігання нафти, то всі види осідання, що зустрічаються на практиці, можна поділити на три групи: рівномірне осідання, «крен» і нерівномірне осідання [7]. Під рівномірним осіданням розуміють осідання, що характеризу-

ється однаковим зміщенням всіх точок крайки днища, а отже і корпусу у вертикальній площині на деяку величину. Під «креном» розуміється таке осідання, в результаті якого весь резервуар нахилиється у одному напрямку. Це осідання характеризується кутом повороту площини днища резервуара відносно горизонту, або величиною різниці висотних позначок діаметрально протилежних точок крайки днища. Нерівномірне осідання – осідання у вигляді місцевих прогинів крайки днища [7, 8].

Основною причиною осідання підвалин резервуарів є те, що навантаження, які передаються резервуаром на підвалину, досягають значних величин. Якщо середнє навантаження по площі підвалини резервуара в основному визначається гідростатичним навантаженням від продукту, що зберігається в ньому і не перевищує для типових резервуарів ємністю до 20000 м³ 0,1...0,12 МПа, то на периферії питоме навантаження від ваги корпусу і покриття досягає 0,9...1,0 МПа [7].

У багатьох випадках нерівномірне осідання виникає вже на етапі будівництва резервуарів із застосуванням заводських рулонних заготовок. При переході на будівництво резервуарів із потовщеною стінкою вказаних випадків стало більше [7].

Штучні фундаменти виконують дві основні функції: належним чином передають навантаження на ґрунт та забезпечують його зв'язок із спорудою, яка на них розміщується. Існує два типи фундаментів: вертикальні палі та дрібні фундаменти. Палі зберігають міцність і структуру ґрунту, їх легко встановити. Фундаменти розподіляються навантаження по ґрунту, однак їх спорудження пов'язане з низкою проблем [9, 10].

Більшість традиційних бетонних фундаментів встановлюють на певну глибину щоб запобігати деформації внаслідок промерзання. При цьому використовують значні об'єми бетону, виконують значну кількість земляних робіт у результаті чого порушується структура ґрунту, блокуються водні потоки та залишається великий об'єм ґрунту який необхідно вивезти.

Технологія Pin Pile поєднує найкращі характеристики різних типів фундаментів. Згрупувавши короткі жорсткі палі, які можна легко забити в непошкоджені проникні ґрунти, і встановивши їх під кутами, щоб вони працювали більше як неглибока опора, можна побудувати міцну основу, яка не потребує земляних робіт [5].

Розглядуваний високоміцний збірний компонент виконує три функції: є направляючим пристроєм для забивання паль, є замком для паль та структурним з'єднанням. Подібно до коріння дерев, технологія Spread Pile Engineering передає навантаження від об'єкту на велику площу ґрунту (рис. 1).

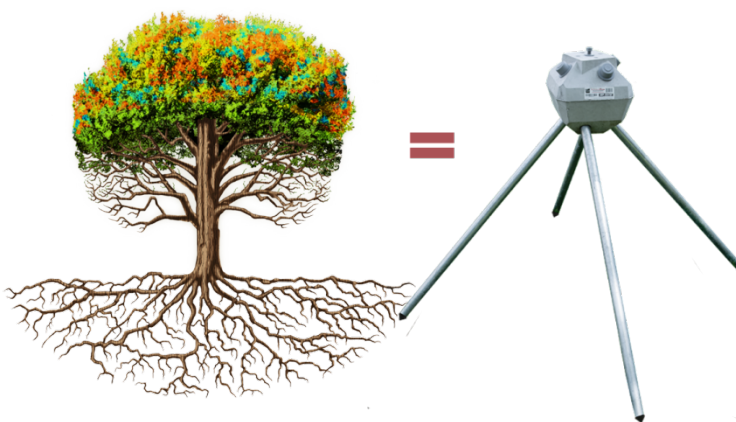


Рис. 1. Принцип роботи фундаменту Diamond Pier

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

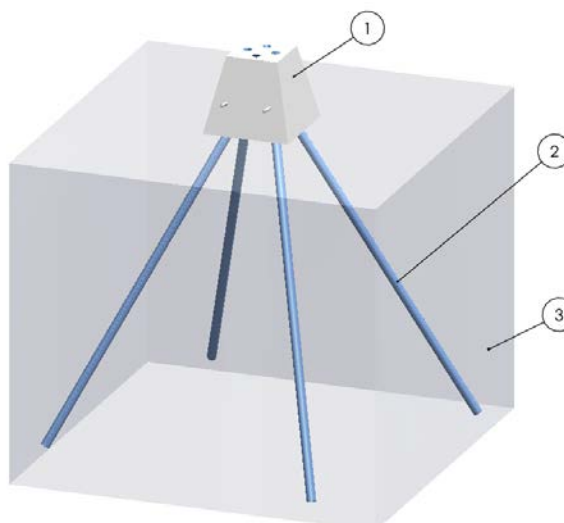
Мета роботи полягає встановленні характеристик фундаментів, які працюють за технологією Pin Pile, шляхом імітаційного моделювання.

Для досягнення мети необхідно:

- побудувати тривимірну модель фундаменту;
- провести імітаційне моделювання фундаменту, проаналізувати результати та окреслити напрямки подальших досліджень.

Викладення основного матеріалу

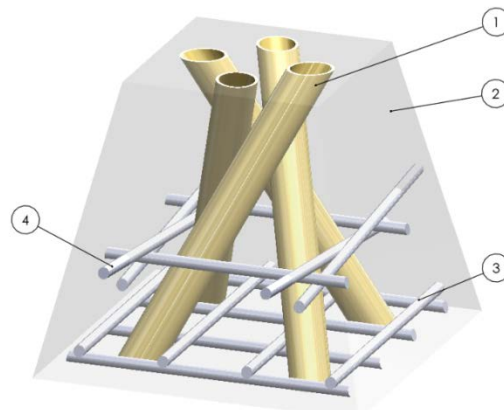
Для встановлення характеристик фундаменту, який працює за технологією Pin Pile, побудовано його тривимірну модель, яка показана на рис. 2.



1 – бетонна головка; 2 – паля; 3 – ґрунт

Рис. 2. Тривимірна модель фундаменту Pin Pile

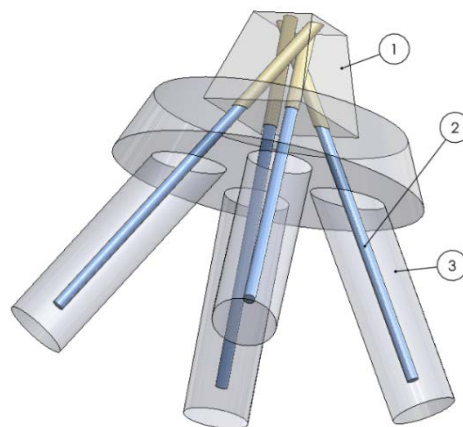
На рис. 3 показано будову армованої бетонної головки.



1 – труба; 2 – бетон; 3 – арматура; 4 – тимчасові ручки для перенесення
Рис. 3. Конструкція армованої бетонної головки

Бетонна головка (рис. 3) складається з чотирьох труб 1 та арматури 3, які з'єднанні між собою зварюванням. Ця зварна конструкція поміщається у форму та заливається бетоном. Труби 1 слугують для встановлення, спрямування та утримання паль (рис. 4).

З метою спрощення та пришвидшення імітаційного моделювання тривимірну модель фундаменту дещо спрощено, а саме, видалено з неї арматуру (рис. 4). При цьому під час моделювання бетонна головка буде розглядатись як «Жорстка». Також для зменшення кількості скінченних елементів об'єм ґрунту зменшено. Його залишено тільки у зоні навколо паль виходячи з міркувань, що деформації у ґрунті будуть незначними та поширюватимуться на невелику відстань.



1 – головка; 2 – паля; 3 – ґрунт
Рис. 4. Спрощена модель фундаменту

На рис. 5 показано розрахункову схему, яку застосовано під час імітаційного моделювання.

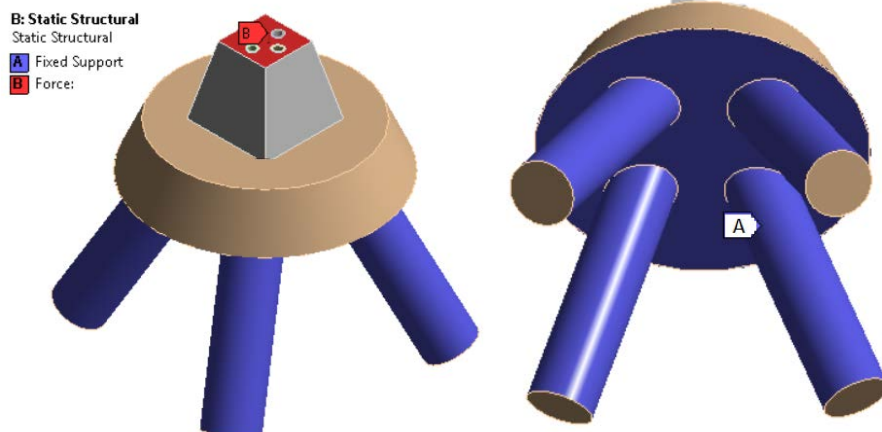


Рис. 5. Розрахункова схема досліджуваної моделі

Згідно розрахункової схеми (рис. 5) фіксування моделі здійснюється за ґрунт навколо паль та за нижню частину ґрунту (А). Прикладання навантаження відбувається зверху на головку (В). Необхідно відмітити, що при дослідженні навантаження поступово збільшували. На першому етапі воно становило 20000 Н, на другому етапі – 30000 Н. Величини прикладених навантажень обумовлені умовами роботи досліджуваного фундаменту.

Матеріалами головки та паль прийнято сталь, а ґрунту – модель з поведінкою ґрунту.

Коефіцієнт тертя між елементами опори та ґрунтом прийнято близьким до 1.

Характеристики цих моделей наведено у таблицях 1-2.

Таблиця 1. Характеристики сталі

Properties of Outline Row 4: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus an...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Таблиця 2. Характеристики ґрунту

Properties of Outline Row 3: Soil			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Cam-Clay		
3	Plastic Slope Parameter	0,014	
4	Slope of Critical State Line	1,24	
5	Initial Size of Yield Surface	2,4132E+05	Pa
6	Minimum Size of Yield Surface	2413,2	Pa
7	Dry Part of Yield Surface Modifier	1	
8	Wetting Part of Yield Surface Modifier	1	
9	Anisotropic Yield Surface Parameter	1	
10	Porous Elasticity		
11	Swell Index	0,0024	
12	Elastic Limit of Tensile Strength	34474	Pa
13	Poisson's Ratio	0,279	
14	Initial Void Ratio	0,3	

У результаті імітаційного моделювання отримано розподіли еквівалентних напружень та переміщень у досліджуваній моделі (рис. 6 та 7).

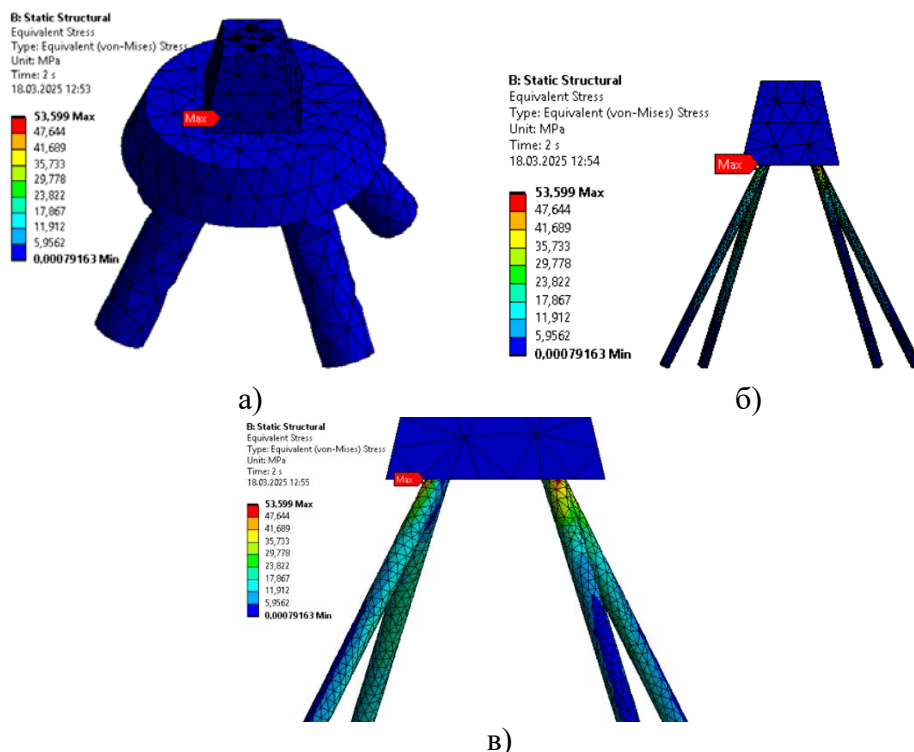


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень

Відповідно до розподілу еквівалентних напружень (рис. 6) максимальні їх величини концентруються в палях на виході труб з бетонної головки. Це пояснюється граничними умовами та принципом робо-

ти конструкції. Максимальна величина еквівалентних напружень складе 53 МПа, що для сталі, з якої виготовлено палі, не є критичним.

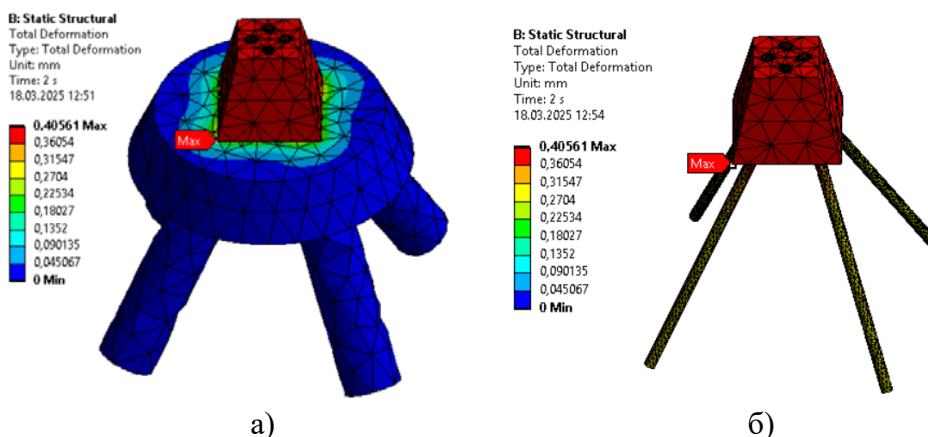
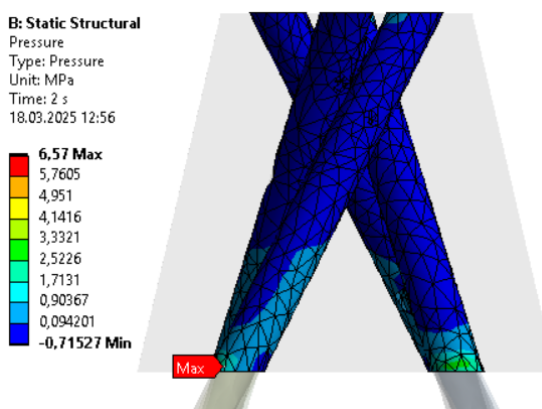


Рис. 7. Переміщення

Щодо переміщень, які спостерігаються у досліджуваній моделі (рис. 7), то максимальна їх величина складає 0,4 мм.



Оскільки конструкція фундаменту містить труби, які контактують із палями, то доцільно визначити величину контактного тиску на їх поверхнях. Згідно з результатами, які показані на рисунку 8, максимальна величина контактного тиску складає 6,5 МПа, що, зважаючи на властивості матеріалів, з яких виготовлено труби та палі, є незначним.

Надалі планується дослідити вплив властивостей ґрунту на напружено-деформований стан фундаменту з метою подальшого його вдосконалення для підвищення експлуатаційних характеристик. Також при цьому доцільно врахувати вплив коефіцієнту тертя між елементами опори та ґрунтом.

Висновки

Встановлено, що імітаційне моделювання з використанням технології Pin Pile дає можливість вибору найраціональніших форм та параметрів фундаментів під різноманітні (великогабаритні, різноманітних форм і розташування) нафтогазові машини і обладнання, що забезпечить надійну їх стійкість на нестійких ґрунтах під час тривалого періоду експлуатації даного устаткування.

За результатами проведеного імітаційного моделювання фундаменту Pin Pile встановлено, що при його роботі згідно заданих умов у ньому виникають незначні переміщення та еквівалентні напруження, що є значно меншими допустимих значень. Проте, з метою адаптації до конкретних експлуатаційних умов планується провести його дослідження з врахуванням властивостей різноманітних ґрунтів та коефіцієнтів тертя між палями та ґрунтом.

Література

1. Лях М. М. Монтаж бурового і нафтогазопромислового обладнання: конспект лекцій. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 126 с.
2. Копей Б. В., Лях М. М. Розрахунок, конструювання, монтаж та експлуатація машин та обладнання для спорудження свердловин: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 612 с.
3. Тимошенко В.М., Лях М. М., Савик В. М. Бурові споруди, їх монтаж та експлуатація. Полтава, 2008. 105 с.
4. Крусь Ю. О. Основи та фундаменти: практикум: навч. посібник. – Вид. 2-ге, перероб. та доп. Рівне: НУВГП, 2019. 247 с.
5. <https://www.diamondpiers.com>
6. Федорович Я. Т. Нафтогазопромислові машини і комплекси: навчальний посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 229 с.
7. Технічне діагностування та ремонт сталевих резервуарів: Навчальний посібник для технічних вузів. В. М.Глоба та ін. Івано-Франківськ: Факел, 2008. 430 с.
8. Парфентьєва І.О., Верешко О.В., Гусачук Д.А. Основи та фундаменти. Навчальний посібник для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія. Луцьк: ЛНТУ, 2017. 296 с.
9. Основи та фундаменти будівель та споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. Зі змінами 1 та 2 – [Чинні від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011 – 161 с. – (Державні будівельні норми України).
10. Науково-технічний збірник «Основи та фундаменти». Випуск 43. За загальною редакцією Ігоря Бойка. К.: КНУБА, 2021. 112 с. DOI: 10.32347/0475-1132.43.2021

Стаття надійшла до редакційної колегії 28.05.2025 р.

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF FOUNDATION ELEMENTS

**O. Ya. Faflei, A. V. Rus, I. R. Matskiv, A. V. Andrusiak,
D. R. Deynega, V. V. Mykhailiuk**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, st.Karpatska, 15;
ph. 0966587275, e-mail: oleh.faflei@nung.edu.ua*

The foundation is the basis of any construction. Currently, various types of foundations and methods of their construction have been developed. Modern construction is faced with complex geological conditions and limited building space, which requires the use of the latest foundation construction technologies. To replace the existing deep-buried concrete foundations, the Pin Pile foundation is becoming widespread - it is a promising alternative, especially in cases where the use of heavy equipment for the delivery of materials and the construction of traditional foundations is impossible or economically inexpedient. However, it is necessary to study and research promising Pin Pile foundations in order to adapt them to specific operating conditions. For this, it is advisable to use simulation modeling based on the finite element method. To establish the characteristics of the foundation constructed using the Pin Pile technology, its three-dimensional model was built. To simplify the simulation modeling, the calculation scheme and the relationships of the structural elements were adjusted. As a result of simulation modeling, the distributions of equivalent stresses and displacements in the studied foundation model were obtained. According to the distribution of equivalent stresses, their maximum values are concentrated in the piles at the exit from the concrete head pipes. This is explained by the boundary conditions and the principle of operation of the foundation. The maximum value of equivalent stresses is 53 MPa, which is not critical for the selected material of the studied piles. As for the displacements observed in the studied foundation model, their maximum value is 0.4 mm. The value of the contact pressure on the "pile-pipe" surfaces was also determined. The maximum value of this pressure is 6.5 MPa, which, given the properties of the materials from which the pipes and piles are made, is acceptable. In further studies, it is planned to establish the influence of soil properties on the stress-strain state of the foundation and to improve it in order to increase its operational characteristics. The coefficient of friction between the foundation elements and the soil will also be taken into account.

Keywords: *Foundation, soil properties, oil and gas equipment, simulation modeling, Pin Pile foundation, stress, deformation.*