

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-24-29>

УДК 66.069.84

УДК 622

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФЛАНЦЕВОГО З'ЄДНАННЯ

Лях М.М., Мацьків І.Р., Врюкало В.В., Яциняк І.І.,
Семенчук А.В., Процюк Г.Я.

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF FLANGE CONNECTIONS

Liakh M.M., Matskiv I.R., Vriukalo V.V., Yatsyniak I.I.,
Semenchuk A.V., Protsiuk H.Y.

Трубопровідна арматура є важливою складовою всіх трубопровідних систем, що охоплюють житлово-комунальне господарство, нафтовидобувну та нафтопереробну промисловість, хімічне виробництво, водопостачання теплових та атомних електростанцій. Особливу увагу приділяють міцності та надійності фланцевих і різьбових з'єднань, оскільки фланці забезпечують міцні, щільні та розбірні з'єднання трубопроводів. Історично розрахунок напружень у фланцевих з'єднаннях почався ще в 1927 році, а в сучасних дослідженнях застосовують метод скінченних елементів (МКЕ), що дозволяє детально моделювати їх напружено-деформований стан, прогнозувати довговічність, знос тощо. Болтові фланцеві з'єднання з прокладками широко використовуються, однак проблема герметичності залишається актуальною через вплив комбінованих навантажень, матеріалів та умов експлуатації. У багатьох роботах висвітлюються проблемні питання, які стосуються фланцевих з'єднань, зокрема проведений нелінійний аналіз з допомогою МКЕ який враховує товщину фланця, різні способи кріплення болтів, їх кількість та попередній натяг, що дозволяє оптимізувати конструкцію фланцевого з'єднання. Є розроблений алгоритм визначення максимального попереднього напруження болтів, який можна застосовувати для різних типів фланцевих з'єднань. Він враховує пластичність матеріалів та контакти фланець-прокладка. У цій роботі особливий акцент робиться на фланцеві з'єднання, які застосовуються у нафтогазовій галузі для з'єднання різноманітного обладнання розміщеного як у ґрунті, так і на поверхні. При цьому сезонні зміни температури

будуть впливати на властивості ґрунту, і як наслідок, на напружено-деформований стан досліджуваних з'єднань. Для оцінки напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання розроблено тривимірну модель, яка складається з фланцевого з'єднання, одна частина труби розміщена в ґрунті, а інша – на поверхні. Результати моделювання показали, що при осьовому навантаженні на фланцеве з'єднання виникає максимальне еквівалентне напруження величиною 141 МПа, а контактний тиск на прокладці дорівнює 9,3 МПа. При урахуванні жорсткості ґрунту, аналогічній зимовим умовам, напруження зростають до 241 МПа, водночас контактний тиск на прокладці та фланцях стає нерівномірним, що призводить до втрати герметичності з'єднання. Враховуючи поширеність таких умов, подальші дослідження рекомендовано зосередити на впливі властивостей ґрунту, коефіцієнтів тертя між ґрунтом і трубою, а також впливі вібрацій, викликаних пульсацією тиску в трубах, на міцність та герметичність фланцевих з'єднань. Це дозволить підвищити надійність трубопровідних систем у складних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: трубопровід, фланцеве з'єднання, імітаційне моделювання, напруження, переміщення, контактний тиск.

Вступ. Трубопровідна арматура є невід'ємною частиною всіх трубопровідних систем, починаючи від житлово-комунального господарства та закінчуючи системами з підвищеними вимогами до технічної безпеки.

До систем з підвищеними вимогами до технічної безпеки належать: системи нафтовидобувних та нафтопереробних підприємств; системи водопостачання теплових електростанцій; основні контури атомної електростанції; системи у хімічному виробництві та переробці [1, 2]. У цих галузях промисловості ставляться підвищені вимоги до міцності та надійності всіх елементів арматури, а особливо фланцевих та різьбових з'єднань. Існує аналітичний метод для розрахунку напружень і переміщень у фланцевих з'єднаннях, а результати розрахунку за цим методом добре узгоджувались з результатами експериментів. Проте, на даний час для дослідження роботи фланцевих з'єднань застосовують сучасні методи, такі як метод скінченних елементів. Для цього застосовується спеціалізоване програмне забезпечення, яке окрім розрахунку напружено-деформованого стану дає можливість прогнозувати довговічність з'єднань, знос від дії абразивного середовища тощо.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Болтові (шпилькові) фланцеві з'єднання з прокладками широко застосовуються в різних галузях для з'єднання труб. Алгоритми проектування, які описані в літературі, переважно зосереджуються на визначенні міцності, тоді як порушення герметичності залишається серйозною проблемою. Крім того, під час аналізу джерел інформації виявлено малу кількість робіт, що стосуються таких з'єднань, які працюють під дією комбінованого навантаження. Для вивчення міцності та герметичності фланцевих з'єднань з ущільненнями у роботі [4] проводиться їх детальний нелінійний аналіз з допомогою методу кінцевих елементів з врахуванням різних способів кріплення болтів. Проведено параметричне дослідження поведінки фланців для визначення напруження в болтах. При цьому змінними є товщина фланця, попередній натяг болта та їх кількість, що одночасно кріплять фланець.

Метою дослідження, висвітленого у праці [5] є розроблення алгоритму для визначення максимального попереднього напруження болта, необхідного для належної роботи прокладки фланцевих з'єднань. Запропонований алгоритм підходить для всіх типів фланців. Також проведено дослідження тривимірної моделі за допомогою методу скінченних елементів із врахуванням пластичної поведінки матеріалу фланця, нелінійної поведінки матеріалу прокладки та нелінійного

контакту фланець-прокладка. Крім того, в даній роботі розглядається вплив довжини прямолінійної частини втулки фланця в місці її зварного з'єднання з трубою і радіуса галтелі на переході втулка-фланець на розподіл напружень і деформацій.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання. Основна увага в даній роботі звернена на фланцеві з'єднання, які використовуються у нафтогазовій галузі. Враховуючи те, що трубопроводи знаходяться в ґрунті під відкритим небом де на них діють змінні у широкому діапазоні кліматичні умови (температура, вологість тощо), а фланцеві з'єднання сполучені з трубопроводом та іншим обладнанням і контактують з атмосферним повітрям, властивості ґрунту суттєво впливають на їх напружено-деформований стан.

Метою роботи є оцінка напружено-деформованого стану елементів фланцевого з'єднання при дії на нього осьового навантаження та з врахуванням властивостей ґрунту, в якому розміщується приєднана до фланця труба.

Для досягнення мети необхідно:

- побудувати модель фланцевого з'єднання, труби та ґрунту і задати їх характеристики;
- провести імітаційне моделювання роботи фланцевого з'єднання із врахуванням властивостей ґрунту, в якому розміщується приєднана до фланця труба;
- проаналізувати отримані результати моделювання, зробити висновки і надати рекомендації щодо покращення умов роботи фланцевого з'єднання.

Викладення основного матеріалу. З моменту експлуатації болтових фланцевих з'єднань виникають порушення герметичності, які призводять до витікання рідини чи газу. Це є серйозною проблемою, особливо коли відбувається витік у навколишнє середовище продукції нафтових та газових свердловин.

На герметичність фланцевих з'єднань впливають конструктивне його виконання, матеріали з яких виготовлено його елементи, моменти згвинчування різьбових з'єднань. Проте, окрім вищезгаданих чинників на герметичність таких з'єднань також впливають і умови навколишнього середовища, а саме зміна температури повітря, промерзання та фізичні властивості ґрунтів, у які прокладаються трубопроводи, вібрації спричинені пульсацією тиску рідини чи газу тощо.

З метою визначення напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання розроблено його тривимірну модель, яку показано на рисунку 1. У цій моделі окрім фланцевого з'єднання є фрагмент трубопроводу частина якого розміщена на поверхні ґрунту, а частина – в ґрунті. На рисунку 2 показано модель фланцевого з'єднання (шип-паз) яке побудовано відповідно [5]. Особливістю під час моделювання цього з'єднання є те, що різьбові з'єднання замінені на циліндри, до яких в подальшому буде прикладатись осьове навантаження для імітації осьового навантаження (для стискання прокладки).

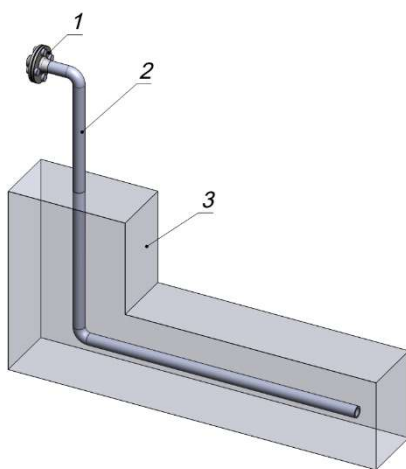


Рис. 1. Модель для дослідження фланцевого з'єднання: 1 – фланцеве з'єднання; 2 – труба; 3 – ґрунт

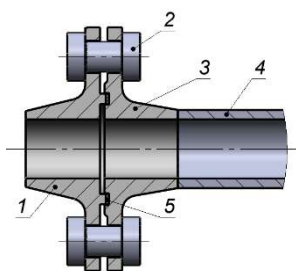


Рис. 2. Фланцеве з'єднання:
1 – фланець з кільцевим шипом; 2 – шпилькове (болтове) з'єднання; 3 – фланець з кільцевим пазом; 4 – труба

Властивості матеріалів, які використані під час імітаційного моделювання наведено у таблиці 1.

Перед проведенням розрахунку модель для дослідження розбита на сітку скінченних елементів, яку показано на рисунку 3.

Таблиця 1

Властивості матеріалів

№ з/п	Матеріал	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона
1	Сталь	200000000000	0,26
2	Фторопласт-4	833565250	0,2
3	Ґрунт	2900000	0,4

Всі наведені цифрові значення є умовними, але знаходяться у межах реальних, отриманих із практичних спостережень.

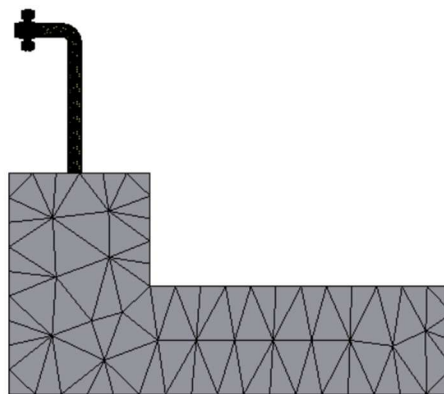


Рис. 3. Сітка скінченних елементів

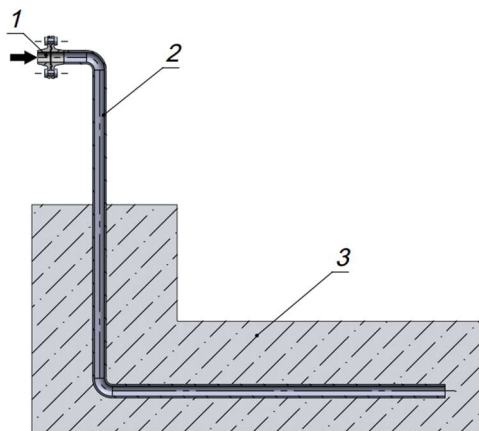


Рис. 4. Розрахункова схема:
1 – різьбове фланцеве з'єднання; 2 – труба; 3 – ґрунт

Згідно розрахункової схеми (рис. 4) на фланцеве з'єднання діє переміщення в горизонтальному напрямку по осі трубопроводу на величину 8 мм (напрямок дії показано стрілкою). Контакт між деталями фланцевого з'єднання прийнято з коефіцієнтом тертя 0,2. Щодо визначення контактного тиску на поверхнях контакту фланців та прокладки застосовано наступний підхід. Спочатку фланцеве з'єднання досліджується окремо тільки за дії осьового зусилля на прокладку, яке обумовлене навантаженням на болтове (шпилькове) з'єднання. Оскільки фланцеве

з'єднання розраховане на тиск 6,3 МПа, на контактних поверхнях фланців та прокладки. Контактний тиск для забезпечення герметичності повинен бути більшим за робочий у 1,5 рази. Після визначення сил на шпильках при якій досягається необхідний контактний тиск на прокладці, продовжуються дослідження цілої моделі. Будуть враховуватись як зусилля на фланцях, так і переміщення фланцевого з'єднання.

На рисунку 5 показано розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі фланцевого з'єднання. Контактний тиск на прокладці та фланцях показаний на рисунку 6.

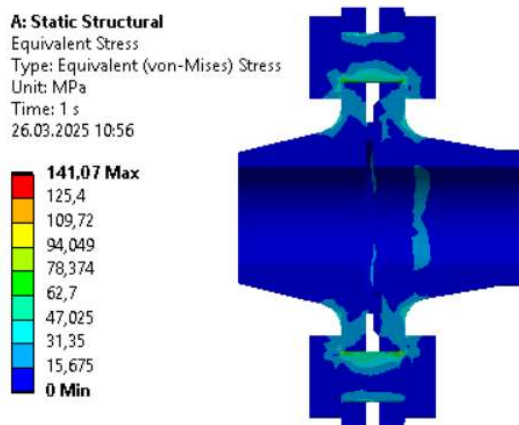


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі фланцевого з'єднання

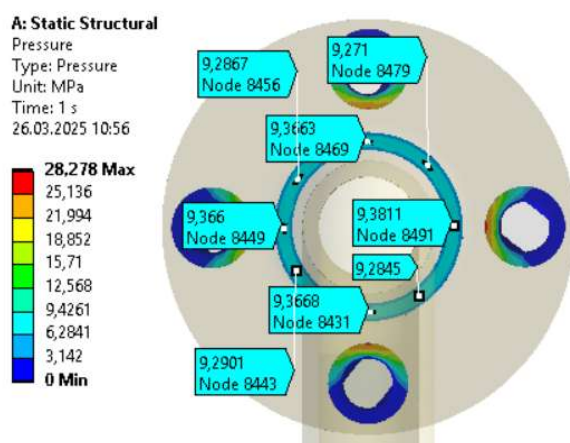


Рис. 6. Розподіл контактного тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка»

Отже, при дії на фланцеве з'єднання тільки осьового навантаження від шпильок у ньому виникає максимальне еквівалентне напруження величиною 141 МПа, яке

концентрується у шпильковому з'єднанні. Щодо розподілу контактного тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка», то на рисунку 6 показано його величини у конкретних точках. Величина контактного тиску на поверхні контакту складає 9,3 МПа.

На наступному етапі дослідження проведено імітаційне моделювання всієї моделі з врахуванням того, що ґрунт є абсолютно жорстким та взаємодіє з трубою, яка розміщена в ньому як одне ціле. Тобто ґрунт та труба в ньому є неподатливими. Жорсткий-неподатливий ґрунт в основному буде у зимових умовах за низьких температур. Переміщення торця фланця у горизонтальному напрямку за досліджуваних умов складають 4 мм.

Отримані результати імітаційного моделювання, наведені на рисунках 7 та 8 відображають розподіл еквівалентних напружень та переміщення елементів досліджуваної моделі відповідно. Рисунок 7 демонструє концентрації напружень у критичних зонах, а рисунок 8 – деформації та напрямки зміщень.

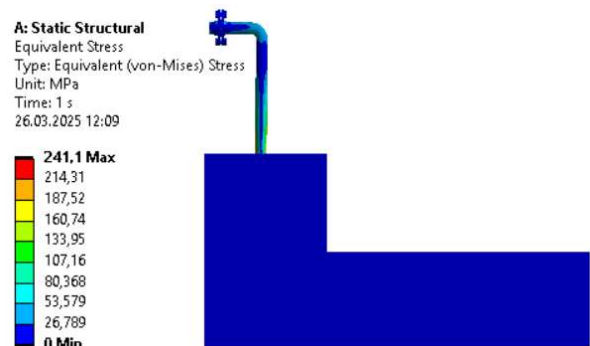


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень у досліджуваній моделі

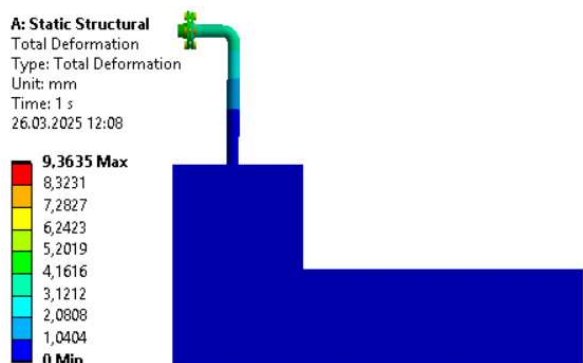


Рис. 8. Переміщення елементів досліджуваної моделі

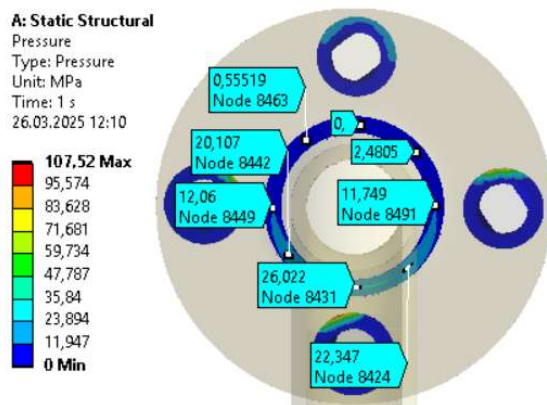


Рис. 9. Розподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка»

Отже, за такої схеми навантаження максимальні еквівалентні напруження у моделі становлять 241 МПа, а переміщення 9,3 мм. При цьому відбувається перерозподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка», з однієї сторони він зростає до 22 МПа, а з іншої знижується до 0 МПа. Це вказує на втрату герметичності такого з'єднання.

Оскільки за вищенаведеною схемою працює доволі багато трубопроводів та фланцевих з'єднань, то доцільно в подальшому провести дослідження впливу властивостей ґрунту на напружено-деформований стан фланцевого з'єднання, а також коефіцієнтів тертя між ґрунтом та трубою. Проте, окрім вищезгаданих чинників на герметичність таких з'єднань також впливають вібрації, що спричинені пульсацією тиску рідини чи газу, які в подальшому доцільно дослідити та врахувати під час проектування фланцевих з'єднань.

Висновки. Для дослідження напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання побудовано його тривимірну модель, трубу та ґрунт. Для цих елементів задано відповідні механічні характеристики.

Дослідження показали, що при дії лише осового навантаження від шпильок у фланцевому з'єднанні виникає максимальне еквівалентне напруження 141 МПа, яке концентрується у шпильковому з'єднанні, а контактний тиск на поверхні «фланець-прокладка» складає 9,3 МПа. При моделюванні з урахуванням жорсткості ґрунту, що діє як неподатливе середовище (характерне для зимових умов), максимальні напруження зростають до 241 МПа, а контактний тиск на прокладці нерівномірно перерозподіляється – з однієї сторони зростає до 22 МПа, з іншої знижується до 0 МПа, що свідчить про втрату

герметичності з'єднання. З огляду на поширеність таких умов експлуатації, рекомендується подальше вивчення впливу властивостей ґрунту та коефіцієнтів тертя між ґрунтом і трубою на напружено-деформований стан з'єднання. Також важливо враховувати вплив вібрацій, спричинених пульсацією тиску робочих середовищ, для підвищення надійності та герметичності фланцевих з'єднань під час їх проектування та експлуатації.

Література

1. Федорович Я. Т. Нафтогазопромислові машини і комплекси: навчальний посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 229 с.
2. Лях М. М. Монтаж бурового і нафтогазопромислового обладнання: конспект лекцій. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 126 с.
3. Khan NB, Abid M, Jameel M, Wajid HA. Joint strength of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure plus axial load with different (industrial and ASME) bolt-up strategy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2015. 231(3): P. 555-564. <https://doi.org/10.1177/0954408915614460>
4. Muhammed Elkhlaidy, Alberto Carnicero, Ricardo Perera Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023. Vol. 202, P. 104912 <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104912>.
5. ДСТУ ISO 7005-1:2005. Металеві фланці. Частина 1. Сталеві фланці (ISO 7005-1:1992, IDT). – Чинний від 2006-07-01. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 38 с.

References

1. Fedorovych Ya. T. Naftohazopromyslovi mashyny i komplekxy: navchalnyi posibnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2020. 229 p.
2. Liakh M. M. Montazh burovoho i naftohazopromyslovoho obladnannia: konspekt lektzii. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2021. 126 p.
3. Khan NB, Abid M, Jameel M, Wajid HA. Joint strength of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure plus axial load with different (industrial and ASME) bolt-up strategy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2015. 231(3): P. 555-564. <https://doi.org/10.1177/0954408915614460>
4. Muhammed Elkhlaidy, Alberto Carnicero, Ricardo Perera Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA *International Journal of Pressure*

- Vessels and Piping*. 2023. Vol. 202, P. 104912 <https://doi.org/10.1016/j.iipvp.2023.104912>.
5. DSTU ISO 7005-1:2005. Metalevi flantsi. Chasty-na 1. Stalevi flantsi (ISO 7005-1:1992, IDT). – Chynnyi vid 2006-07-01. – Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006. – 38 p.

Liakh M.M., Matskiv I.R., Vriukalo V.V., Yatsyniak I.I., Semenchuk A.V., Protsiuk H.Y. Study of the stress-strain state of flange connections

Pipe fittings are an important component of all piping systems covering housing and communal services, oil production and refining, chemical production, water supply to thermal and nuclear power plants. Particular attention is paid to the strength and reliability of flanged and threaded connections, as flanges provide strong, tight, and detachable pipe connections. Historically, the calculation of stresses in flange connections began as early as 1927, and modern research uses the finite element method (FEM), which allows detailed modeling of their stress-strain state, predicting durability, wear, etc. Bolted flange connections with gaskets are widely used, but the problem of tightness remains relevant due to the influence of combined loads, materials, and operating conditions. Many studies highlight problematic issues related to flange connections, in particular, a nonlinear analysis using FEM that takes into account the thickness of the flange, various methods of fastening bolts, their number and preload, which allows optimizing the design of the flange connection. An algorithm has been developed to determine the maximum preliminary bolt tension that can be applied to various types of flange connections. It takes into account the plasticity of materials and flange-gasket contacts. This work focuses on flange connections used in the oil and gas industry to connect various equipment located both in the ground and on the surface. Seasonal temperature changes will affect the properties of the soil and, as a result, the stress-strain state of the connections under study. To assess the stress-strain state of a flange connection, a three-dimensional model was developed, consisting of a flange connection with one part of the pipe located in the ground and the other on the surface. The

simulation results showed that under axial loading, the flange connection experiences a maximum equivalent stress of 141 MPa, and the contact pressure on the gasket is 9.3 MPa. When taking into account soil stiffness similar to winter conditions, stresses increase to 241 MPa, while contact pressure on the gasket and flanges becomes uneven, leading to a loss of joint tightness. Given the prevalence of such conditions, further research should focus on the influence of soil properties, friction coefficients between the soil and the pipe, and the influence of vibrations caused by pressure pulsations in pipes on the strength and tightness of flange connections. This will improve the reliability of pipeline systems in difficult operating conditions.

Key words: pipeline, flange connection, simulation modeling, stress, displacement, contact pressure.

Лях Михайло Михайлович – к. т. н, професор кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Мацьків Ігор Романович – аспірант кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Врюкало Віктор Володимирович – к. т. н, доцент кафедри кафедра комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Яциняк Іван Ігорович – к. т. н, доцент кафедри інформаційних технологій та програмування, Івано-Франківська філія Університету “Україна”

Семенчук Андрій Васильович – канд. фіз-мат. наук, доцент кафедри фізико-математичних наук Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Процюк Галина Ярославівна – асистент кафедри інженерії програмного забезпечення, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 04.09.2025.