

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-282-2-37-42>

УДК 622

ОСОБЛИВОСТІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

Дейнега Р. О., Михайлюк В. В., Романишин Т.Л., Процюк Г. Я.,
Петрушко Ю. М., Мельничук Р.В.

FEATURES OF SIMULATION PRESSURE VESSELS

Deineha R.O., Mykhailiuk V.V., Romanyshyn T.L., Protsiuk H.Y.,
Petrushko Y.M., Melnychuk R.V.

Для транспортування, зберігання та проходження різноманітних процесів сьогодні використовують різні посудини (сепаратори, резервуари, абсорбери, десорбери тощо). Вони працюють за важких умов, оскільки на них діють одночасно декілька різних навантажень. Наприклад, на резервуар для зберігання скрапленого газу діють одночасно вага робочого середовища, власна вага, температура робочого середовища, температура навколишнього середовища, внутрішній тиск та сейсмічні навантаження. Під час проєктування таких посудин, зазвичай, використовують спрощені математичні моделі, у яких не враховуються як деякі навантаження, так і напрямки їх прикладання. Сьогодні для розроблення різноманітних машин та обладнання застосовують різні комп'ютерні програми, що дозволяють не тільки розробляти технічну документацію, а й програми, у яких проводиться імітаційне моделювання їх роботи. До таких програм належать Ansys, Catia, Autodesk Inventor, SolidWorks. Зазвичай у цих програмах для розв'язання інженерних задач використовується метод скінченних елементів, який дозволяє розділити складну геометрію конструкції на простіші частини – скінченні елементи. Такі програми можуть мати навіть спеціальні модулі, які дозволяють проводити моделювання окремих видів виробів та враховують їх специфічні умови роботи. У цій статті наведено алгоритм імітаційного моделювання посудини, що працює під тиском, згідно якого проведено моделювання та отримано результати у програмі SolidWorks Simulation. Особливістю імітаційного моделювання посудин, що працюють під тиском є те, що спочатку необхідно провести їх дослідження за кожного окремо прикладеного навантаження. Потім, за допомогою модуля "Проєктування посудини, що працює під тиском" поєднуються

результати моделювань, використовуючи лінійну комбінацію в алгебраїчній формі та отримуються величини еквівалентних напружень. Варто також зауважити, що для коректної роботи вищезгаданого модуля сітку скінченних елементів, на яку розбивається модель посудини необхідно копіювати з першого у всі наступні дослідження. У іншому випадку розрахунку у модулі "Проєктування посудини, що працює під тиском" не відбудеться.
Ключові слова: посудина під тиском, імітаційне моделювання, еквівалентні напруження.

Вступ. Зважаючи на сучасний розвиток технологій, розроблення та дослідження нових конструкцій машин та обладнання виникає потреба у менших на це затратах ресурсів та часу. Для цього широко застосовують системи автоматизованого проєктування (САПР), за допомогою яких можливо не тільки розробляти технічну документацію на вироби (CAD-системи), а також імітувати роботу цих виробів (CAE та CFD системи) тощо.

Під час проєктування посудин, що працюють під тиском, застосовуються регламентовані алгоритми розрахунку напружено-деформованого стану їх елементів. Проте, у процесі роботи, на такі посудини діють одночасно багато різноманітних навантажень, таких як вага робочого середовища, власна вага посудини, температура робочого та зовнішнього середовища, внутрішній тиск, сейсмічні навантаження. Звести отримані результати окремих розрахунків до спільних значень дуже

важко. Тому варто для цього застосовувати сучасні САЕ-системи.

Виходячи з вищезгаданого, дослідження напружено-деформованого стану елементів посудин, що працюють під тиском, при комплексній дії на нього різноманітних навантажень є актуальною задачею, розв'язання якої дасть змогу встановити доцільність регламентованого коефіцієнту запасу міцності при неврахуванні вищезазначених чинників, а також зменшити матеріалоємність елементів конструкції посудини (сепаратора, адсорбера, резервуара тощо), не зменшуючи їх міцності.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

В хімічній, нафтохімічній, нафтогазовій, цементній та інших промисловостях застосовують велику кількість посудин, серед яких резервуари, напірні баки, сепаратори, адсорбери, десорбери тощо. Посудини застосовують для продуктів, які надзвичайно різні за своїми властивостями, у тому числі для пожежонебезпечних, агресивних та застигаючих рідин, різноманітних газів та їх сумішей, у зв'язку з чим висуваються визначені вимоги до конструкції цих посудин. Найбільш відповідальними посудинами є ті, які працюють під тиском та є великого діаметру. Із збільшенням об'єму посудини зменшуються питома витрата матеріалу на одиницю об'єму, площа, що займає посудина, кількість застосовуваного обладнання (штуцерів, опор, люків-лазів тощо). Звідси і впливає намагання максимально збільшувати об'єми посудин [1].

Посудини бувають наступних конструкцій: циліндричні (вертикальні та горизонтальні), каплеподібні, кульові (сферичні) та спеціальних типів. За способом встановлення можуть бути наземними, напівпідземними та підземними.

Наприклад, горизонтальні циліндричні резервуари, призначені для зберігання продукції під надлишковим тиском (до 0,2 МПа) та зріджених газів (під тиском до 1,8 МПа та більше). У таких резервуарах за зниження температури можливий вакуум (до 0,1 МПа). Горизонтальні циліндричні резервуари мають обмежений діаметр, який обумовлюється способом та засобами його транспортування (залізничним чи автотранспортним) до місця встановлення. Зазвичай, діаметри резервуарів знаходяться в межах від 1,4 до 3,25 м.

Перевагою горизонтальних резервуарів є простота конструкції, масове виготовлення на заводах та транспортування у зібраному вигляді, зручність монтажу. До недоліків належать

необхідність використання спеціальних опор і складність виміру об'єму продукту, що в ньому знаходиться [2]. Проте, визначення об'єму резервуарів на стадії її розроблення можливо за допомогою сучасних систем автоматизованого проектування. Спосіб автоматизованого розроблення градуальної таблиці горизонтальних резервуарів із врахуванням кута їх нахилу відносно горизонталі та розміщеного всередині технологічного обладнання на стадії його розроблення наведено у роботі [3].

Корпус горизонтального резервуара складається з кількох листових обечайок. Ширину листів приймають у межах 1500...2000 мм. Для забезпечення жорсткості при транспортуванні, монтажі або за наявності вакууму в середині резервуару розташовують спеціальні конструкції. Днища горизонтальних циліндричних резервуарів залежно від величини тиску та його діаметру можуть бути плоскими, конічними, циліндричними, сферичними, напівеліптичними. Надземні резервуари, зазвичай, встановлюють на дві сідлоподібні опори, кут охоплення корпусу яких опори складає 120°. Резервуари обладнуються штуцерами для завантаження, розвантаження продукції, люком-лазом, контрольно-вимірювальною апаратурою, запобіжними пристроями, а також зовнішніми сходами та заземленням.

Сьогодні зростають вимоги до конструкцій посудин, що працюють під тиском, а саме ефективного використання матеріалів, зменшення витрат на виготовлення, підвищення якості тощо. Задоволення вищезгаданих вимог може бути забезпечене за рахунок низки заходів щодо розроблення нових конструкцій, дослідження та вдосконалення існуючих. Одним із факторів, які визначають реалізацію умов успішного вирішення цих завдань при забезпеченні працездатності та надійності обладнання, є розробка та впровадження нових прогресивних методів та алгоритмів розрахунку на міцність та використання оптимального проектування. Складність конструктивних форм, специфічні умови експлуатації висувають до розрахунків посудин специфічні та підвищені вимоги. Необхідність забезпечення працездатності та надійності таких виробів визначає актуальність проблеми розрахункової оцінки несучої здатності елементів обладнання, що працює у складних умовах експлуатації.

При проектуванні посудин основним завданням є вибір їх конструктивних параметрів, що забезпечують високу

ефективність (мінімальну матеріаломісткість, достатній запас міцності та жорсткості, низьку собівартість тощо) [4, 5].

Розробка будь-якого виробу є циклічним ітераційним процесом, при якому конструктор розглядає ряд варіантів виробу, порівнює їх за обраними критеріями ефективності, виконує оцінювальні розрахунки. При розробці досить складних виробів, як правило, розглядають не більше 2-3 варіантів конструкції через обмеження у часі (на виконання трудомістких розрахунків). Найбільш трудомісткими є розрахунки, пов'язані з оцінкою працездатності конструкцій. Виконуючи розрахунки на міцність, конструктор здебільшого використовує спрощені розрахункові схеми. Так, при розрахунку на міцність циліндричних посудин часто використовують балочну математичну модель, у якій не враховують реальну геометрію конструкції, неосесиметричний характер її навантаження та ряд інших чинників. Великий практичний досвід розробки виробів такого типу дозволяє створювати працездатні конструкції, проте питання можливості підвищення їх ефективності залишається відкритим. Зважаючи на відсутність точних і доступних методів розрахунку на міцність посудин, конструктор змушений призначати завищені коефіцієнти запасу міцності, що призводить до збільшення металоемності конструкції, перевитрати дефіцитних матеріалів, підвищених енергетичних витрат тощо. Тому поряд з проблемою обґрунтування несучої здатності та ресурсу посудин особливого значення набувають питання, пов'язані з постановкою та вирішенням завдань оптимального проектування на основі застосування уточнених методів розрахунку на міцність для систематичного дослідження характерних особливостей роботи методами фізичного та чисельного експерименту.

Вирішення трудомістких завдань аналізу напружено-деформованого стану елементів машин та обладнання на основі математичних моделей високого рівня з урахуванням конкретних умов експлуатації, достовірна та надійна оцінка їхньої несучої здатності, пошук оптимальних проєктних рішень можливі лише за умови ефективного використання сучасної комп'ютерної техніки. У зв'язку з цим розроблення нових методів та алгоритмів розрахунку і оптимального проєктування машин та обладнання на основі математичних моделей високого рівня та їх реалізація у вигляді

програмних комплексів для ПК набувають великого значення [5].

Сьогодні найпоширенішими програмами, що дозволяють проєктувати та досліджувати різноманітне обладнання є Ansys, Catia, Autodesk Inventor, SolidWorks. У цих програмах для розв'язання інженерних задач використано метод скінченних елементів, який дозволяє розділити складну геометрію конструкції на простіші частини – скінченні елементи. Рівняння, що описують фізичні явища (напруження, деформації, теплопередачу тощо), розв'язуються для кожного елемента окремо, а потім ці розв'язки об'єднуються для отримання глобального розв'язку всієї системи. Це дозволяє точно моделювати поведінку складних конструкцій під дією різних навантажень [6].

У роботі [7] досліджено горизонтальну посудину під тиском об'ємом 10 м³ для зберігання зрідженого пропанового газу (LPG) з використанням програми ANSYS. Посудина під тиском у цьому дослідженні є циліндричною з двома еліптичними днищами, містить штуцери, люк і дві сідлові опори. Результати досліджень показали, що конструкція має необхідну міцність. Також встановлено, що найвищі величини напружень концентруються біля люку, в корпусі та днищах. У сідлових опорах величини напружень є найменшими. Проте, варто зауважити, що при дослідженні не враховано всі можливі навантаження, що діють на посудину.

Отже, для якомога точнішої оцінки напружено-деформованого стану посудин, що працюють під тиском, необхідно проаналізувати умови роботи, розробити алгоритм розрахунку та обговорити отримані результати імітаційного моделювання, що буде розглянено у цій статті.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у дослідженні напружено-деформованого стану посудини, що працює під тиском з врахуванням ваги робочого середовища, власної ваги посудини, температури робочого та зовнішнього середовища, внутрішнього тиску та сейсмічних навантажень.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати умови роботи посудини, що працює під тиском;
- провести імітаційне моделювання посудини із врахуванням одночасної дії різних навантажень.

– проаналізувати результати імітаційного моделювання.

Викладення основного матеріалу

На практиці трапляються випадки виходу з ладу різноманітних посудин, що працюють під тиском. Їх причинами інколи є те, що ще на стадії розроблення не враховують сумісну дію таких навантажень як: тиску, температури, власної ваги, ваги рідини та сейсмічних навантажень.

Під час імітаційного моделювання посудини, що працює під тиском, було проведено ряд окремих досліджень. Кожне навантаження до посудини прикладалось окремо та виконувався розрахунок. Далі за допомогою модуля "Проектування посудини, що працює під тиском", що поєднує результати статичних досліджень, використовуючи лінійну комбінацію в алгебраїчній формі були отримані величини еквівалентних напружень.

На рисунку 1 показано розрахункову схему посудини, що працює під тиском. Згідно цієї схеми одна опора посудини є нерухоною, а інша – рухоною.

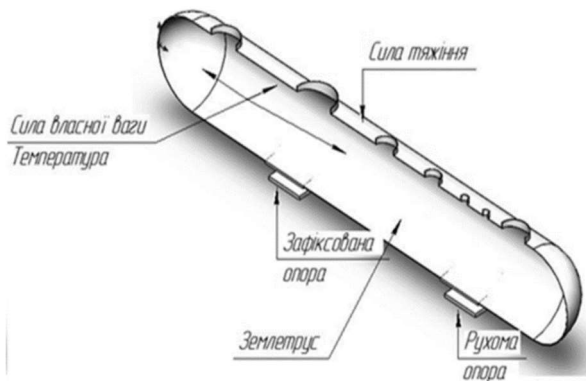


Рис. 1. Розрахункова схема

Алгоритм проведення розрахунку посудини, що працює під тиском, наведений на рисунку 2.



Рис. 2. Алгоритм розрахунку посудини, що працює під тиском

Граничними умовами під час імітаційного моделювання посудини, що працює під тиском прийнято фіксацію рухомої та нерухомої опор, причому рухома опора має можливість переміщуватись вздовж осі корпусу. Посудина

досліджувалась при таких значеннях параметрів: робочий тиск (0,5 МПа), температура (100°C), власна вага та вага рідини (55840 кг), сейсмічні навантаження ($G=2 \text{ м/с}^2$ (8 балів)).

Нижче наведено результати імітаційного дослідження, а саме розподіли еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі посудини, від кожного окремо прикладеного навантаження.

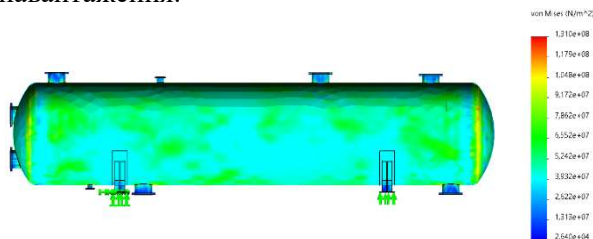


Рис. 3. Еквівалентні напруження (від дії робочого тиску $P=0,5 \text{ МПа}$)

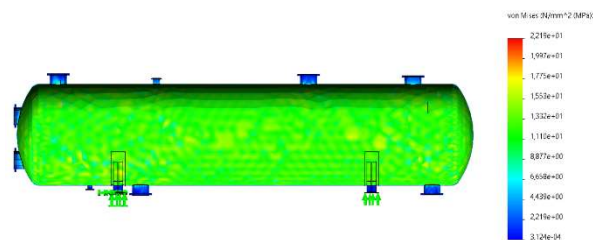


Рис. 4. Еквівалентні напруження (від дії температури на стінки $t=100^\circ\text{C}$)

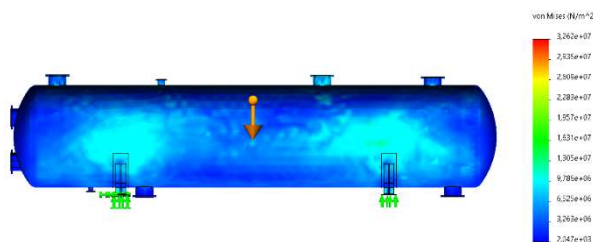


Рис. 5. Еквівалентні напруження (від дії власної ваги та ваги рідини $M=55840 \text{ кг}$)

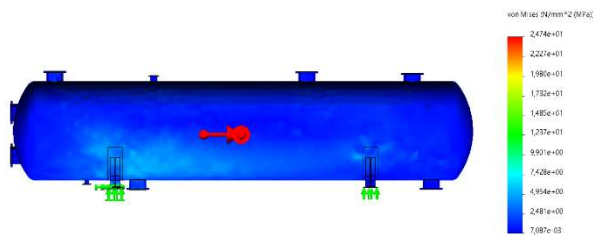


Рис. 6. Еквівалентні напруження (від дії сейсмічних навантажень $G=2 \text{ м/с}^2$ (8 балів))

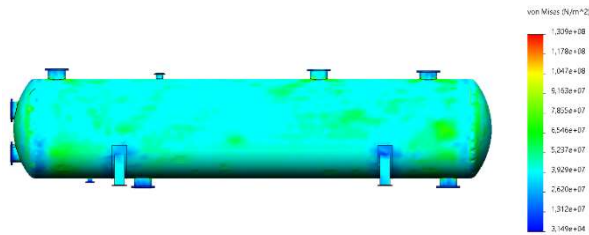


Рис. 7. Еквівалентні напруження (від дії всіх вищезазначених навантажень)

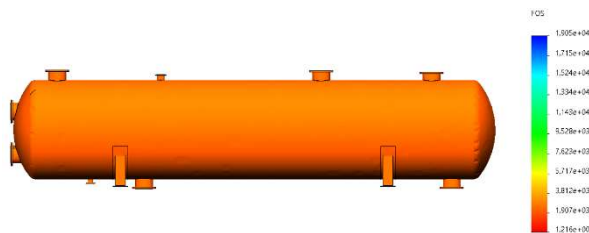


Рис. 8. Коефіцієнт запасу міцності

З проведеного імітаційного моделювання можна зробити висновок, що при сумісній дії всіх прикладених навантажень міцність посудини буде забезпечена. Проте при проектуванні конструкцій таких посудин слід приділяти більше уваги з'єднанням їх конструктивних елементів (патрубків, опор, підкладних листів тощо), оскільки, як бачимо з результатів, саме в цих елементах відбувається концентрація напружень. Отримані результати проведеного імітаційного моделювання можуть бути використані у подальших розрахунках (наприклад, на втому).

Висновки

Проаналізувавши умови роботи посудини, що працює під тиском, встановлено, що на неї діють одночасно багато різноманітних навантажень, такі як вага робочого середовища, власна вага посудини, температура робочого та зовнішнього середовища, внутрішній тиск, сейсмічні навантаження. Неврахування одного із вищевказаних навантажень під час проведення розрахунків може призвести до руйнування елементів посудини, що працює під тиском, і є неприпустимим.

Під час імітаційного моделювання посудини, що працює під тиском, було проведено ряд окремих досліджень. Кожне навантаження до посудини прикладалось окремо та виконувався розрахунок. Далі за допомогою модуля "Проектування посудини, що працює під тиском" який поєднує результати статичних досліджень, використовуючи лінійну комбінацію в алгебраїчній формі були отримані величини еквівалентних напружень.

За допомогою імітаційного дослідження встановлено розподіл еквівалентних напружень у конструкції посудини та визначено їх максимальні

значення (130,9 МПа). Зважаючи на це, надалі можливо оптимізувати конструкцію посудини, а отримані результати імітаційного моделювання використати у подальших розрахунках на втому.

Література

1. Врагов А.П. Масообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: навч. посіб. Суми: Університетська книга, 2007. 284 с.
2. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій. Луцьк: Вежа-Друк, 2020. 155с.
3. Михайлюк, В. В., Процюк, Г. Я., Юрич, А. Р., Юрич, Л. Р., Бабець, М. В., & Стецюк, Р. Б. (2022). Автоматизоване розроблення градууювальної таблиці горизонтальних резервуарів. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, (2(53), 47–53. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-2\(53\)-47-53](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-2(53)-47-53)
4. Костриба І. В. Основи конструювання нафтогазового обладнання: навч. посіб. Івано-Франківськ: Факел, 2007. 194 с.
5. <https://tekhnosfera.com/raschet-na-prochnost-i-optimalnoe-proektirovanie-gorizontalnyh-tsilindricheskih-rezervuarov>
6. <https://www.solidworks.com/>
7. Abdewi, Elfetori & Fahel Alboum, Nureddin.. Design and Static Structural Analysis of a Horizontal Pressure Vessel. 2023. 31.

References

1. Vrahov A.P. Masoobminni protsesy ta ob-ladnannia khimichnykh i hazonaftopererobnykh vyrob-nystv: navch. posib. Sumy: Unversytetska knyha, 2007. 284 p.
2. Onyshchuk O.O., Kormosh Zh.O. Protsey ta aparaty khimichnykh vyrobnystv: kurs lektsii. Lutsk: Vezha-Druk, 2020. 155 p.
3. Mykhailiuk, V. V., Protsiuk, H. Ya., Yurych, A. R., Yurych, L. R., Babets, M. V., & Stetsiuk, R. B. (2022). Avtomatyzovane rozroblennia hraduiival-noi tablytsi horyzontalnykh rezervuariv. Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnich-noho universytetu nafty i hazu, (2(53), 47–53. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-2\(53\)-47-53](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-2(53)-47-53)
4. Kostryba I. V. Osnovy konstruiuvannia naftohazovoho obladdnannia: navch. posib. Ivano-Frankivsk: Fasel, 2007. 194 p.
5. <https://tekhnosfera.com/raschet-na-prochnost-i-optimalnoe-proektirovanie-gorizontalnyh-tsilindricheskih-rezervuarov>
6. <https://www.solidworks.com/>
7. Abdewi, Elfetori & Fahel Alboum, Nureddin.. Design and Static Structural Analysis of a Horizontal Pressure Vessel. 2023. 31.

Deineha R.O., Mykhailiuk V.V., Romanyshyn T.L., Protsiuk H.Y., Petrushko Y.M., Melnychuk R.V.
Features of simulation pressure vessels

Various vessels (separators, tanks, absorbers, desorbers, etc.) are used today for transportation, storage and passing of various processes. They work under difficult conditions, as several different loads act on them at the same time. For example, the weight of the working environment, its own weight, the temperature of the working environment, the temperature of the surrounding environment, internal pressure and seismic loads act simultaneously on a liquefied gas storage tank. During the design of such vessels, simplified mathematical models are usually used, which do not take into account both some loads and the direction of their application. Today, for the development of various machines and equipment, various computer programs are used, which allow not only to develop technical documentation, but also programs that simulate their operation. Such programs include Ansys, Catia, Autodesk Inventor, SolidWorks. Usually, in these programs, the finite element method is used to solve engineering problems, which allows you to divide the complex geometry of the structure into simpler parts - finite elements. Such programs can even have special modules that allow simulation of certain types of products and take into account their specific operating conditions. This article provides an algorithm for simulation modeling of a pressure vessel, according to which the simulation was carried out and the results were obtained in the SolidWorks Simulation program. The peculiarity of simulation modeling of vessels operating under pressure is that it is first necessary to conduct their research for each separately applied load. Then, with the help of the "Design of a pressure vessel" module, the simulation results are combined using a linear

combination in an algebraic form and the equivalent stress values are obtained. It is also worth noting that for the correct operation of the aforementioned module, the grid of finite elements into which the vessel model is divided must be copied from the first to all subsequent studies. Otherwise, the calculation in the "Design of a pressure vessel" module will not take place.

Key words: *pressure vessel, simulation, equivalent stresses*

Дейнега Руслан Олександрович – к.т.н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Михайлюк Василь Володимирович – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Романишин Тарас Любомирович – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Процюк Галина Ярославівна – асистент кафедри прикладного програмування та обчислення, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Петрушко Юрій Миронович – аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Мельничук Ростислав Васильович – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Стаття подана 05.04.2024.