

DOI 10.15589/jnn20150304  
УДК 622.691  
Д42

## STUDY OF UNLOADING PROCESSES FOR SHIPS TRANSPORTING COMPRESSED NATURAL GAS (CNG)

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВАНТАЖЕННЯ СУДЕН ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ (CNG)

**Andrey P. Dzhus**  
andriy\_dzhus@i.ua  
ORCID: 0000-0002-0859-0979

**Aleksandr M. Susak**  
susak52@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-5359-8769

**Valeriy V. Zaytsev**  
zvalv1974@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-8590-5671

**А. П. Джус**  
канд. техн. наук, доц.<sup>2</sup>

**О. М. Сусак**  
канд. техн. наук, доц.<sup>2</sup>

**Вал. В. Зайцев**  
д-р техн. наук, доц.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

<sup>1</sup>*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

<sup>2</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk*

<sup>2</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ*

**Abstract.** The article presents the results of the study of the unloading processes in the ships equipped with the compressed natural gas transportation modules, which are made in accordance with the standard sea container dimensions. It was established that the unloading process is characterized by constant decrease of gas pressure in the tanks and the flow rate of gas that flows out of them. The maximum speed of the process is achieved due to maintaining the critical mode of gas flow. The nature of the gas pressure variation in the module containers at its unloading through the control devices of a 20 mm diameter and more are identical and determined by the parameters of pipelines which connect the tanks. The «alternating discharge» principle was proved inexpedient at the need of ensuring high speeds of small-capacity ships unloading, as it reduces the operating temperature beyond the values allowable for all types of cylinders. The cylinders of the combined type are made of materials which have thermal conductivity coefficients varying by hundreds of times. When using them, the existence of such rates and levels of the temperature reduction will contribute to expansion of the sliding surfaces or to a complete detachment of the elements of the combined design. The obtained results are noteworthy in the design of cargo systems of the marine means of the compressed natural gas transportation. They can also be applied as the basis for completing individual blocks under the conditions of using the CNG modules offered by global manufacturers. With these results, it is possible to substantiate the modes of unloading of marine means of transport according to the conditions of individual projects realization. For a more profound analysis of existing processes and their impact on the stress-strain state of the high-pressure tanks and those of the combined type in particular, further study of the gas temperature change till the complete ship unloading is required.

**Keywords:** compressed natural gas; simulation modeling; unloading process; gas temperature.

**Аннотация.** Приведены результаты исследования процессов разгрузки судов, оборудованных модулями для транспортировки сжатого природного газа, которые изготавливаются в соответствии с размерами стандартного морского контейнера. Установлен характер изменения давления и температуры газа в емкостях модуля при различных скоростях реализации процесса. Обоснована нецелесообразность соблюдения принципа «поочередного опорожнения» при больших скоростях разгрузки судов.

**Ключевые слова:** сжатый природный газ; имитационное моделирование; процесс разгрузки; температура газа.

**Анотація.** Наведено результати дослідження процесів розвантаження суден, обладнаних модулями для транспортування стиснутого природного газу, які виконуються за розмірами стандартного морського контейнера. Встановлено характер зміни тиску і температури газу в ємностях модуля за різних швидкостей реалізації процесу. Обґрунтовано недоцільність дотримання принципу «почергового спорожнення» при великих швидкостях розвантаження суден.

**Ключові слова:** стиснутий природний газ; імітаційне моделювання; процес розвантаження; температура газу.

## REFERENCES

- [1] Dzhus A. P., Susak O. M., Shkitsa L. Ye. *Vykorystannia imitatsiinoho modeliuvannia dlia doslidzhennia protsesiv zapovnennia suden CNG* [Use of simulation modeling for the study of the CNG ships filling processes]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnalпередovykh tekhnologiy — East European Journal of Advanced Technologies*, 2014, no. 2(3), pp. 4–9.
- [2] Dzhus A. P., Susak O. M. *Doslidzhennia umov ekspluatatsii yemnostei, vykonanykh u vyhliadi dovhomirnykh trub* [Studying the operating conditions of containers made in the form of long tubes]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnalпередovykh tekhnologiy — East European Journal of Advanced Technologies*, 2014, no. 5(7), pp. 25–30.
- [3] Dzhus A. P., Hrydzhuk Ya. S. *Zabezpechennia protsesiv zavantazhennia i rozvantazhennia morskyykh transportnykh zasobiv pry transportuvanni stysnutoho pryrodnoho hazu* [Providing processes of loading and unloading of marine transportation vehicles when transporting compressed natural gas; Technology audit and reserves of production]. *Tekhnologicheskyy audit i rezervy proizvodstva — Technology audit and reserves of production*, 2015, no. 2(1), pp. 64–69.
- [4] Dzhus A. P. *Osoblyvosti vykorystannia kombinovanykh yemnostei dlia transportuvannia stysnenoho pryrodnoho hazu (CNG) morskymy akvatoriiamy* [Specific features of combined containers for compressed natural gas (CNG) transporting in the offshore zone]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch — Exploration and development of oil and gas fields*, 2015, no. 1, pp. 34–40.
- [5] OAO «Polimertekh» — OJSC «Polymertech». Available at: <http://pth.nn.ru/products/izdeliy%20iz%20stecloplastika/>
- [6] PAGZ. *Ustroystvo / NPK «LYeNPROMAVTOMATIKA» — Mobile gas tank trucks. Arrangement / SPC «LEN-PROMAUTOMATICS»*. Available at: <http://www.lenprom.spb.ru/products/pagz/ustroystvo/>
- [7] Stenning D. Dzh., Kren D. E. *Sudovaya sistema dlya transportirovki szhatogo gaza* [Ship system for the compressed gas transportation]. Patent RF, no. 98110263.
- [8] *Peredvizhnye avtogazozapravshchiki (PAGZ)* [Mobile gas tank trucks] / ZAO «GazServisKompozit» — CJSC «GasServiceComposite». Available at: <http://gassc.com/peredvizhnye-avtozapravshiki-pagz.html>
- [9] KGTM Kelley Gas Transport Modules. Available at: <http://kelleygtm.com/about/>

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

До недавнього часу основні дослідження щодо технології транспортування стиснутого природного газу (CNG) були присвячені розробленню обладнання і засобів для його зберігання і транспортування. Питання реалізації процесів їх завантаження і розвантаження відходили на задній план. Однак, зважаючи на велику різноманітність можливих умов використання технології CNG, ці процеси є такими, що потребують особливого вивчення.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

За результатами патентного пошуку стосовно цих питань слід зауважити, що в більшості із джерел декларується принцип «почергового заповнення» ємностей вантажної системи [7]. Перевага такого заповнення полягає в тому, що компресор стискає газ до його повного розрахункового тиску майже постійно, чим забезпечує максимальну ефективність роботи. За допомогою спеціального транспортного засобу стиснутий природний газ перевозиться до розвантажувального терміналу. Під час розвантаження газ під високим тиском подається на декомпресійне облад-

нання, де його тиск знижується до необхідного для приймального трубопроводу. При цьому можливими є різні варіанти використання енергії декомпресії газу високого тиску: для вироблення електроенергії; приведення в дію криогенної установки виробництва скрапленого газу, який може зберігатися і піддаватися регазифікації за необхідності підтримки процесу газопостачання.

У певний момент у процесі розвантаження газу його тиск у транспортному засобі може бути недостатнім для реалізації процесу з необхідними швидкістю і тиском. У цей час газ подають на компресійне обладнання розвантажувального терміналу, де його доводять до тиску, необхідного для приймального трубопроводу. Якщо описаний вище процес здійснюють одразу з невеликими групами відсіків, відбувається «почергове спорожнення», яке, як і при заповненні, більшу частину часу забезпечує для компресора розрахунковий протитиск і, отже, використання цього компресора з максимальною ефективністю.

Аналіз особливостей процесів завантаження і розвантаження морських транспортних засобів, наведений у [3], свідчить про те, що вони можуть протікати в критичному і докритичному режимах. Процес розвантаження як при критичному, так

і докритичному режимі супроводжується постійним зменшенням тиску в ємностях вантажної системи і відповідно маси газу, що витікає з них. Найбільшою швидкістю процес розвантаження характеризується за умов відсутності докритичних режимів витікання газу.

У ході проведених на сьогодні досліджень, зокрема висвітлених авторами в [2, 3], отримані результати можуть бути використані в проектуванні вантажних систем морських транспортних засобів для транспортування стиснутого природного газу. Також вони можуть слугувати за основу при комплектуванні окремих блоків за умов застосування пропонованих світовими виробниками CNG модулів [6, 8, 9]. Однак додатково уваги потребують дослідження процесів розвантаження транспортних засобів, зокрема зміни температури газу всередині ємностей вантажної системи за різних швидкостей і схем реалізації.

Для реалізації будь-якого окремого проекту необхідною є достатня кількість транспортних засобів, які мають відповідну місткість і швидкість. При цьому передбачається наявність у пункті розвантаження, за винятком непередбачених обставин, пришвартованого і розвантажуваного суден. Організована таким чином робота суднової системи для транспортування стиснутого природного газу забезпечує такий же рівень постачання, як і магістральний трубопровід природного газу. В іншому варіанті проекту суднові трубопроводи і компресорна станція можуть бути розраховані так, що газ з суден розвантажують за відносно короткий час (наприклад, 2–8 годин) порівняно зі звичайним часом розвантаження. Цей варіант виконання забезпечує можливість подачі палива з метою зниження пікового попиту.

Як для першого, так і для другого варіанта розвантаження може відбуватися шляхом «почергового спорожнення». Однак, за швидкого розвантаження почергово підключених окремих ємностей чи їх блоків може призвести до суттєвого зниження температури газу, а відповідно і вантажних ємностей, і з'єднувальних трубопроводів. Оскільки будь-який із варіантів виконання вантажних ємностей (CNG-1, CNG-2, CNG-3, CNG-4) передбачає наявність певних обмежень щодо мінімальних робочих температур, то дослідження зміни температури газу всередині ємностей вантажних систем за різних швидкостей і схем реалізації процесу є необхідними і такими, що сприятимуть забезпеченню їх експлуатаційної надійності.

**МЕТА РОБОТИ** — дослідження зміни тиску і температури газу всередині ємностей вантажних систем за різних швидкостей і схем реалізації процесу розвантаження морських транспортних засобів.

Для досягнення цієї мети необхідно:

– встановити параметри процесів розвантаження морських транспортних засобів за різних варіантів їх реалізації;

– дослідити характер зміни тиску і температури газу в ємностях певного об'єму за різних швидкостей реалізації процесу.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На сьогодні світовими виробниками пропонуються модулі для транспортування стиснутого природного газу, які виконуються за розмірами стандартного морського контейнера. За допомогою спеціальних кріплень модулі здатні монтуватися на транспортних засобах, призначених для перевезення контейнерів. Спільною особливістю модулів для транспортування стиснутого природного газу є те, що балони з'єднуються сталевими трубопроводами малого діаметра з колектором, який обладнаний запірними і вимірювальними пристроями (рис. 1). За умов монтажу зазначених модулів на морських транспортних засобах, зокрема баржах, постає необхідність їх об'єднання в спеціальні групи або відсіки. Кожна група модулів, а за необхідності і кожен модуль, обов'язково повинні бути обладнані не тільки запірними, а й регулюючими пристроями. Саме за їх допомогою забезпечується реалізація необхідного режиму розвантаження транспортного засобу.

Для виконання поставлених завдань необхідні дослідження, проведені шляхом імітаційного моделювання. Для цього використані спеціалізоване програмне забезпечення і методика, можливість застосування якої підтверджена в [1]. З метою спрощення моделювання проведено дослідження для одного модуля, що обладнаний регулюючим пристроєм і з'єднаний з ділянкою трубопроводу, в якій здійснюється розвантаження газу (рис. 2).

Як зазначалось вище, згідно з [3] процес розвантаження є таким, що супроводжується постійним зниженням тиску, відповідно забезпечити його стаціонарність практично неможливо. При розвантаженні газу в трубопровід з робочим тиском 5 МПа на початковому етапі, а саме до моменту зниження тиску в балонах до близько 10 МПа, спостерігається критичне витікання газу. У подальшому триває витікання газу в докритичному режимі й відповідно витрата газу знижується більш інтенсивно. У певний момент часу витрата газу наближається до нуля, що зумовлюється вирівнюванням тиску в балонах модуля й трубопроводі. Процес розвантаження газу продовжується введенням в дію на ділянці з'єднувального трубопроводу обладнання для стиснення газу (рис. 2).

Момент введення його в дію визначається мінімально допустимим рівнем зниження витрати газу й характеристикою наявного обладнання для стиснення. Тому на першому етапі моделювання розглянуто процес витікання газу в трубопровід до моменту вирівнювання тисків за різних значень

діаметрів прохідних перерізів регулюючих пристроїв (5, 10, 20, 30, 50 мм). Досліджуваними параметрами при цьому були тиск і температура газу. Отримані в процесі моделювання результати зміни тиску газу наведено на рис. 3.

На графіку зміни тиску зображено показники для центрального балона модуля (середній ряд, середній балон). З метою підтвердження допустимості такого усереднення проведено аналіз щодо ідентичності



Рис. 1. Модуль для транспортування стиснутого природного газу, укомплектований балонами типу CNG-2

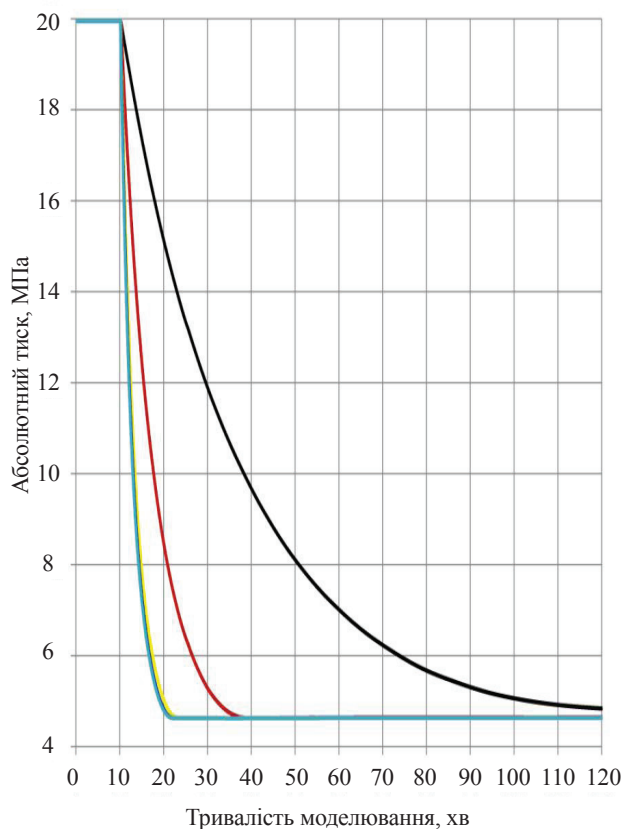


Рис. 3. Зміна тиску газу в балонах за різних параметрів регулюючих пристроїв: ■ — діаметр 5 мм; ■ — діаметр 10 мм; ■ — діаметр 20 мм; ■ — діаметр 30 мм; ■ — діаметр 50 мм;

процесів у різних балонах модуля (рис. 4). Таким чином встановлено, що незначна відмінність процесів присутня тільки при великих швидкостях витікання газу (діаметр регулюючого пристрою 50 мм, рис. 4, а); при їх зменшенні в різних балонах модуля процеси є ідентичними (діаметр регулюючого пристрою 5 мм, рис. 4, б).

Найбільш важливим з міркувань безпеки процесу розвантаження параметром є температура газу

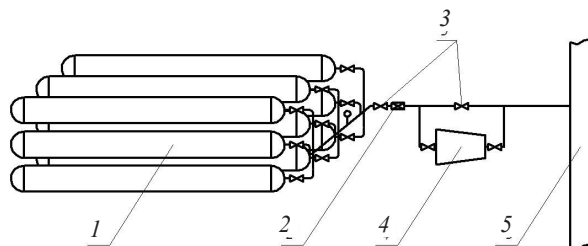


Рис. 2. Схема, що реалізується в процесі моделювання: 1 — модуль для транспортування стиснутого природного газу; 2 — регулюючий пристрій; 3 — запірні пристрої; 4 — обладнання для стиснення газу; 5 — магістральний трубопровід

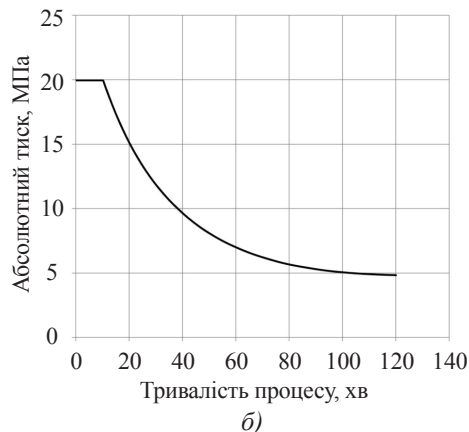
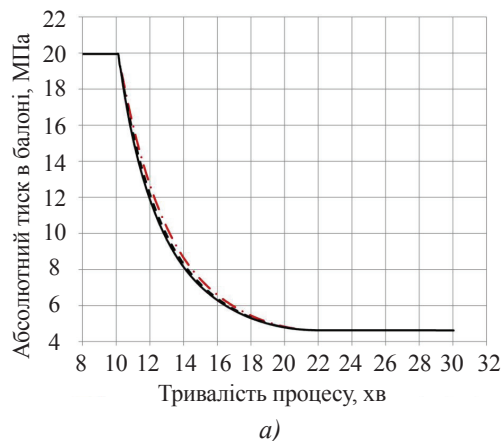


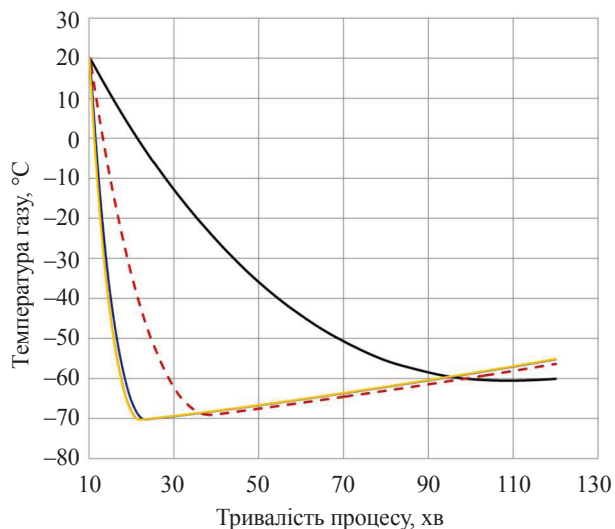
Рис. 4. Зміна тиску газу в балонах різних шарів при діаметрі регулюючого пристрою 50 мм (а) та 5 мм (б): -·-·- — верхній ряд; - - - - середній ряд; — — нижній ряд



в балоні, яка разом із температурою навколишнього середовища визначає можливий діапазон робочих температур ємностей високого тиску (балонів).

Результати аналізу зміни температури в процесі розвантаження модуля при різних значеннях діаметрів регулюючих пристроїв подано на рис. 5. Як бачимо, характер і рівень зниження температури при більших значеннях діаметрів регулюючих пристроїв (20, 30, 50 мм) є практично однаковим. За мінімального діаметра (5 мм) градієнт і рівень зниження є меншим завдяки теплообміну між балонами і навколишнім середовищем, однак він істотно залежить від погодних умов, вплив яких на даному етапі досліджень не враховано.

Аналіз показав, що за великих діаметрів регулюючих пристроїв процес витікання зумовлюється параметрами з'єднувальних трубопроводів у модулі, при цьому спостерігається падіння температури газу



**Рис. 5.** Зміна температури газу в балонах за різних параметрів регулюючих пристроїв: ■ — діаметр 5 мм; ■ — діаметр 10 мм; ■ — діаметр 20 мм; ■ — діаметр 30 мм; ■ — діаметр 50 мм;

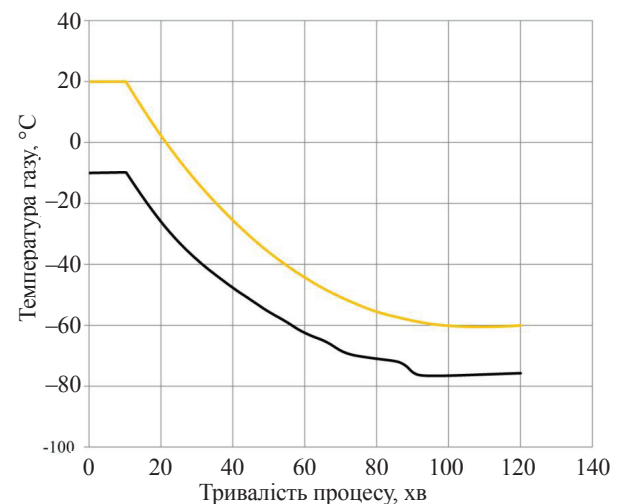
**ВИСНОВКИ.** За необхідності розвантаження суден, обладнаних модулями для транспортування стиснутого природного газу, які виконуються за розмірами стандартного морського контейнера, впродовж менше двох годин з дотриманням принципу «почергового спорожнення» зниження температури газу може сягати 90°C.

При від'ємних значеннях температури газу в початковий момент процесу розвантаження характер

на 90°C за приблизно 10 хв. За умов використання балонів типу CNG-2, циліндрична частина яких виконана з матеріалів, що характеризуються різними коефіцієнтами теплопровідності [5], наявність таких темпів зниження температури сприятиме збільшенню площин ковзання або і повного відшарування елементів комбінованої конструкції [4].

Для оцінки впливу початкових параметрів газу на рівень зниження температури дослідження її зміни проведено для випадку початкового значення 20°C та -10°C (рис. 6) й отримано аналогічний характер змін з дещо меншим загальним рівнем зниження температури газу.

Отже, на першому етапі розглянуто зміни параметрів стану газу впродовж зниження тиску в модулях до тиску в магістральному трубопроводі, у який скидається газ.



**Рис. 6.** Зміна температури газу в балонах за різних початкових температур і діаметра регулюючого пристрою 5 мм: ■ — 20°C; ■ — -10°C

термодинамічних процесів є таким, що вже на етапі, який реалізується без використання обладнання для його стиснення, призводить до зниження робочої температури за межі значень, допустимих для всіх типів балонів.

Таким чином, отримані результати досліджень необхідно враховувати в ході проектування процесів розвантаження суден і виборі обладнання для їх реалізації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Джус, А. П. Використання імітаційного моделювання для дослідження процесів заповнення суден CNG [Текст] / А. П. Джус, О. М. Сусак, Л. Є. Шкіца // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 2 (3). — С. 4–9.

- [2] Джус, А. П. Дослідження умов експлуатації ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб [Текст] / А. П. Джус, О. М. Сусак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 5 (7). — С. 25–30.
- [3] Джус, А. П. Забезпечення процесів завантаження і розвантаження морських транспортних засобів при транспортуванні стиснутого природного газу [Текст] / А. П. Джус, Я. С. Гриджук // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 2 (1). — С. 64–69.
- [4] Джус, А. П. Особливості використання комбінованих ємностей для транспортування стисненого природного газу (CNG) морськими акваторіями [Текст] / А. П. Джус // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2015. — № 1. — С. 34–40.
- [5] ОАО «Полимертех» [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://pth.nn.ru/products/izdeliy%20iz%20stecloplastika/>
- [6] ПАГЗ. Устройство [Электронный ресурс] / НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА». — Режим доступа : <http://www.lenprom.spb.ru/products/pagz/ustroystvo/>
- [7] Пат. 2145689 РФ, МПК F17C001/00, F17C005/06, F17C007/00. Судовая система для транспортировки сжатого газа / Стеннинг Д. Дж., Крэн Д. Э. — № 98110263; заявл. 28.10.1996; опубл. 20.02.2000, Бюл. № 3. — 16 с.
- [8] Передвижные автогазозаправщики (ПАГЗ) [Электронный ресурс] / ЗАО «ГазСервисКомпозит». — Режим доступа : <http://gassc.com/peredvizhnye-avtozapravshiki-pagz.html>
- [9] KGTM Kelley Gas Transport Modules [Electronic resource]. — Available at : <http://kelleygtm.com/about/>

© А. П. Джус, О. М. Сусак, Вал. В. Зайцев

Надійшла до редколегії 21.05.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. Ю. М. Коробанов