

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА КОНИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ**

Статья посвящена исследованию трения скольжения, определению размеров исполнительных поверхностей после воздействия нагрузки. Выделено специальную конструкцию конического подшипника скольжения, работающего в составе мобильного растворосмесителя. Приведены детальные расчеты величины износа конического подшипника. Теоретические исследования показывают, что давление на поверхности подшипника распределяется согласно гиперболической зависимости. Поверхностные слои пары трения требуют использования износостойких покрытий.

**Ключевые слова:** подшипник скольжения, цапфа, вставка, износ, величина износа, скорость износа, время износа.

*Попов Станіслав Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Україна, e-mail: psv26@mail.ru.*

*Васильєв Анатолій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування, Полтавський на-*

*ціональний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Україна, e-mail: vas.anatoly@gmail.com.*

*Леднік Роман Анатолійович, кафедра технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Україна, e-mail: vin4ester13@mail.ru.*

*Попов Станіслав Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения, Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Украина.*

*Васильев Анатолий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения, Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Украина.*

*Ледник Роман Анатольевич, кафедра технологии машиностроения, Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Украина.*

*Popov Stanislav, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Ukraine, e-mail: psv26@mail.ru.*

*Vasilyev Anatoly, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Ukraine, e-mail: vas.anatoly@gmail.com.*

*Lednik Roman, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Ukraine, e-mail: vin4ester13@mail.ru*

УДК 622.691.4

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41397

Джус А. П.,  
Гриджук Я. С.

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ І РОЗВАНТАЖЕННЯ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Встановлено, що при завантаженні морських транспортних засобів під тиском джерела газу постійна швидкість забезпечується за умов протікання процесу у критичному режимі. Процес розвантаження характеризується постійним зменшенням тиску газу в ємностях і витрати газу, що витікає з них. Максимальної швидкості процесів досягають підтриманням критичного режиму шляхом поетапного введення в дію компресорів.

**Ключові слова:** стиснутий природний газ, процес завантаження і розвантаження, режим течії, діаметр з'єднувального трубопроводу.

### 1. Вступ

Оптимальним методом транспортування природного газу, видобутого з невеликих за запасами і розмічених на віддалених між собою ділянках морських родовищ, є перевезення газу в стиснутому стані спеціальними суднами або баржами з використанням CNG технологій.

З урахуванням загального рівня енергозалежності України та існуючих можливостей видобутку газу на шельфі Чорного моря біля о. Зміїний, а також в перспективі освоєння глибоководного шельфу, технологію CNG доцільно розглядати як першочергову за необхідності створення гнучкої системи транспортування видобутих вуглеводнів. Тому дослідження, що сприяють впровадженню технології, є вкрай важливими для нафтогазової галузі України.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Стиснутий природний газ зазвичай перевозять наземним транспортом і зберігають у балолах під тиском до 25 МПа за температури навколишнього середовища. Для транспортування газу морськими акваторіями проектується спеціальні CNG судна, а у випадку використання несамохідних барж вантажними ємностями можуть слугувати балони, змонтовані у декілька шарів [1] або об'єднані у спеціальні модулі.

На сьогодні світовими виробниками пропонуються модулі для транспортування стиснутого природного газу, які за призначенням є рухомими автогазозаправниками. Такі модулі виконуються за розмірами стандартного морського контейнера, з допомогою спеціальних кріплень монтуються на шасі, призначеному для перевезення

контейнерів, і комплектуються балонами різних типів. Модулі з балонами CNG-1 характеризуються найнижчою ціною, але мають найбільшу масу (рис. 1, а) [2]. Для транспортування стиснутого природного газу доцільніше використовувати балони CNG-2 (рис. 1, б) [3] і CNG-3, однак найкращими технічними характеристиками володіють балони CNG-4 (рис. 1, в) [4]. Спільною особливістю модулів для транспортування стиснутого природного газу є те, що балони сполучаються сталевими трубопроводами малого діаметра (рис. 1). Це зумовлено особливостями використання модулів та характеристиками автогазонаповнювальних станцій, на яких здійснюється їх завантаження.



а



б



в

Рис. 1. Модулі для транспортування стиснутого природного газу, укомплектовані балонами: а — CNG-1; б — CNG-2; в — CNG-4

Транспортування газу морськими акваторіями характеризується значно більшими об'ємами перевезень, а також швидкостями процесів завантаження та розвантаження. Зважаючи на це, постає питання дослідження особливостей їх реалізації і, зокрема, за умов дотримання принципу почергового заповнення та випорожнення ємностей вантажної системи [5]. Для ємностей, виконаних у вигляді рухомих трубопроводів [6], окремі дослідження проведені і висвітлені в [7]. Що стосується процесу заповнення балонів та витікання газу з них, то цікаві результати отримані авторами з використанням імітаційного моделювання [8] та числових методів у програмі MATLAB [9]. Однак, вони не дають вичерпної відповіді на ряд запитань.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — процеси завантаження та розвантаження морських транспортних засобів.

Метою даної статті є дослідження процесів завантаження та розвантаження морських транспортних засобів, визначення діаметрів з'єднувальних колекторів, за яких забезпечуються необхідні швидкості з враху-

ванням схем їх реалізації та обмежень щодо діапазону робочих температур елементів вантажних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- встановити особливості протікання процесів завантаження та розвантаження морських транспортних засобів;
- визначити діаметри з'єднувальних колекторів, за яких забезпечуються необхідні швидкості процесів завантаження;
- визначити тиск газу всередині балону впродовж його розвантаження, а також тривалість цього процесу за різних схем реалізації.

### 4. Аналіз особливостей протікання процесів завантаження та розвантаження морських транспортних засобів

Під час завантаження із джерела газу тиск в ємностях вантажної системи поступово зростає від тиску порожніх ємностей до робочого тиску. Процес проходить у два етапи. На першому етапі процес завантаження протікає під тиском джерела газу, а на другому — з використанням компресорів. Розвантаження морських транспортних засобів передбачає витікання газу з ємностей в газову магістраль. На першому етапі процес протікає під тиском газу в ємності, а другий етап вимагає введення в дію компресорів.

Таким чином, процес завантаження і розвантаження морських транспортних засобів на окремих етапах описується як перетікання газу з однієї ємності в іншу. Такими ємностями при завантаженні є джерело газу і вантажна система, а при розвантаженні — вантажна система і газова магістраль.

Сам процес на згаданих вище етапах може протікати у двох режимах: критичному і докритичному [9].

Режим течії визначається співвідношенням тисків середовища, з якого витікає газ ( $P_0$ ) і середовища, куди газ потрапляє ( $P_1$ ):

$$\beta = \frac{P_1}{P_0}. \quad (1)$$

Критичне значення  $\beta$  визначається як:

$$\beta_{\text{кр}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2)$$

де  $k$  — показник адіабати.

Таким чином, якщо  $\beta \leq \beta_{\text{кр}}$  досягається критичний режим течії газу. При цьому швидкість  $v$  газового потоку еквівалентна швидкості звуку і вже не залежить від співвідношення тисків  $\beta$  [10]:

$$v = v_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0}, \quad (3)$$

де  $R$  — газова стала;  $T_0$  — температура середовища, звідки витікає газ.

Оскільки зміна параметрів газу в ємності, з якої він витікає, описується адіабатою Пуассона:

$$\frac{P_1}{\rho_1^k} = \frac{P_0}{\rho_0^k},$$

звідки:

$$\rho_1 = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \rho_0,$$

а співвідношення тисків:

$$\frac{P_1}{P_0} = \beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

секундна масова витрата буде рівною:

$$\begin{aligned} Q_m &= f \rho_1 v = f \left[ \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{\frac{1}{k}} \rho_0 \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} = \\ &= f \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} RT_0 \rho_0^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $f$  — площа перерізу труби, через яку витікає газ;  $\rho_0$  — густина газу в ємності, з якої він витікає.

В докритичному режимі швидкість  $v$  газового потоку поступово знижується і залежить від параметра  $\beta$ :

$$v = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_0 \left[ 1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (5)$$

При цьому секундна масова витрата становить:

$$Q_m = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho_0^2 RT_0 \left[ \beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (6)$$

Залежність витрати газу від співвідношення тисків за умов постійної температури  $T_0$  і тиску  $P_0$  наведена на рис. 2 (крива 1). Цей випадок характерний саме для процесу завантаження газу в ємності вантажної системи із джерела, яким може бути свердловина або група свердловин. За умов розвантаження морських транспортних засобів постійним є протитиск, а тиск в ємності, звідки витікає газ, змінюється. При цьому залежність витрати газу від співвідношення тисків описується кривою 2 (рис. 2) [10, 11].

З огляду на суттєві відмінності у протіканні процеси завантаження та розвантаження морських транспортних засобів надалі розглядатимемо окремо.

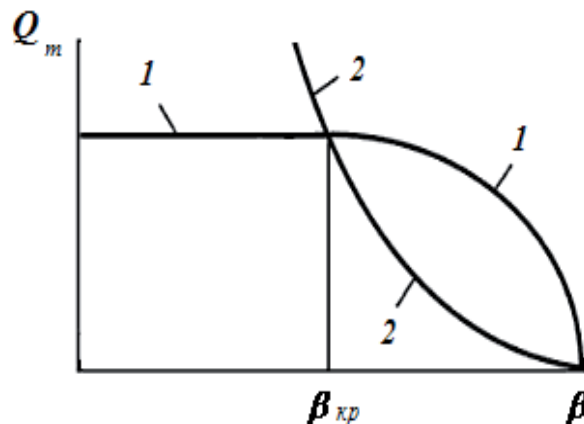


Рис. 2. Залежність масової витрати газу від співвідношення тисків: 1 —  $P_0 = \text{const}$ ; 2 —  $P_0 = \text{var}$

### 5. Дослідження процесів завантаження та розвантаження морських транспортних засобів

Нехай за умов завантаження транспортних засобів джерело газу характеризується параметрами  $T_0, P_0$ , а стан газу в окремій ємності вантажної системи об'ємом  $V_1$  — відповідно  $P_1, T_1$ . Площа переріз з'єднувального трубопроводу —  $f$ . При цьому джерело газу будемо розглядатимемо як ємність необмеженого об'єму (рис. 3), з якої витікає газ.

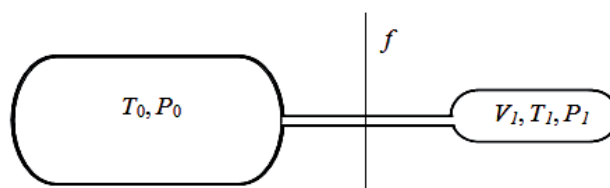


Рис. 3. Схема процесу заповнення ємності вантажної системи

Оскільки у початковий момент тиск газу в ємності вантажної системи є дуже низьким ( $P_1 = 0,2...0,3$  МПа) порівняно із тиском джерела газу, газ рухатиметься з'єднувальним трубопроводом з критичною швидкістю. За рахунок перетікання газу тиск в ємності вантажної системи поступово збільшується. Коли співвідношення вказаних тисків досягне критичного значення  $\beta_{кр}$ , витрата газу у з'єднувальному трубопроводі почне зменшуватися і при вирівнюванні тисків досягне нуля.

Додатковою умовою в процесі завантажування морських транспортних засобів є відповідність витрати газу у з'єднувальному трубопроводі продуктивності джерела газу. Щоб знайти площу поперечного перерізу з'єднувального трубопроводу, необхідну для реалізації процесу заповнення ємності за умов, що визначаються параметрами джерела газу, слід прирівняти продуктивність джерела газу до витрати газу при критичному витіканні. Для зручності вираз (4) запишемо у вигляді:

$$Q_m = f \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} RT_0 \rho_0^2} = f \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} P_0 \rho_0}. \quad (7)$$

При цьому для визначення густини газу скористаємося рівнянням стану реального газу:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{zRT_0}, \quad (8)$$

де  $z$  — коефіцієнт стисливості, який для розглянутого діапазону тисків визначається як:

$$z = 2 \left( \frac{1,21}{P_{зв} + 1} \right)^{\frac{0,529}{T_{зв}^{4,4}}}, \quad (9)$$

де  $P_{зв} = P_0 / P_{кр}$  — зведений тиск;  $T_{зв} = T_0 / T_{кр}$  — зведена температура;  $P_{кр}$ ,  $T_{кр}$  — відповідно критичний тиск і критична температура газу [12].

На рис. 4 зображено залежність мінімально необхідного діаметра з'єднувального трубопроводу від параметрів джерела газу.

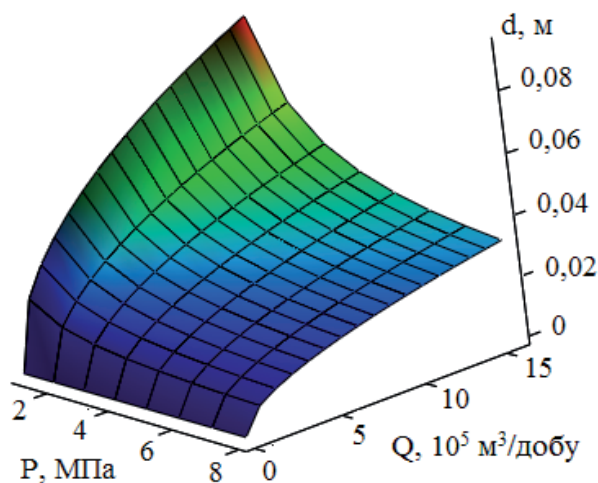


Рис. 4. Залежність мінімально необхідного діаметра з'єднувального трубопроводу від параметрів джерела газу

Уникнути зменшення масової витрати через з'єднувальний трубопровід при досягненні критичного значення співвідношення тисків можна шляхом введення в дію компресора. За умов використання багатоступеневого компресора підбір його параметрів необхідно здійснювати з врахуванням робочого тиску ємності. Приймаючи для природного газу показник адиабати рівним 1,3, отримаємо, що  $\beta_{кр} = 0,5457$ . Зважаючи на це, можна стверджувати, що для забезпечення критичного режиму впродовж всього процесу завантаження тиск компресора повинен бути майже удвічі вищим за робочий тиск ємностей вантажної системи. Це є недопустимим з міркувань енергоефективності процесу завантаження. Однак на даному етапі необхідно врахувати, що при збільшенні тиску джерела газу за рахунок введення в дію компресора густина газу збільшиться. Це призведе до зменшення необхідного діаметра з'єднувального трубопроводу. Приймаючи допустиме перевищення тиску компресора над робочим тиском (20 МПа) ємностей вантажної системи рівним 5 % отримаємо, що тиск на виході компресора не повинен перевищувати 21 МПа.

Тоді, скориставшись виразом для масової витрати за умов докритичного режиму (6), отримаємо залежність мінімально необхідного діаметра з'єднувального трубопроводу від масової витрати (рис. 5) на завершальному етапі заповнення ємності.

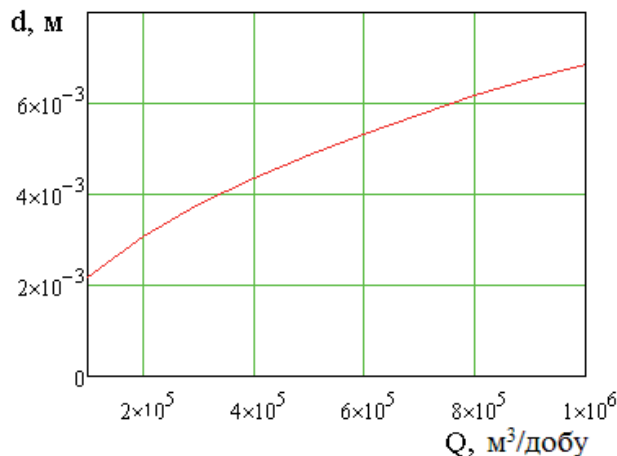


Рис. 5. Залежність мінімально необхідного діаметра від швидкості завантаження

Також важливим моментом у процесі заповнення ємностей вантажної системи є зміна температури газу, а відповідно і самої ємності. Результати проведених попередніх досліджень особливостей температурних змін висвітлені у [8]. Рівень підвищення температури стінок ємності є таким, що не створює обмежень щодо використання конструкцій різних типів.

При розвантаженні морських транспортних засобів постає питання визначення тривалості цього процесу, або, інакше кажучи, часу витікання газу із ємностей вантажної системи через з'єднувальні трубопроводи певного діаметра.

Як вже зазначалось вище, витікання газу з ємності обмеженого об'єму супроводжується поступовим зменшенням тиску в ній. Така особливість зумовлює відповідно зменшення витрати газу через з'єднувальний трубопровід навіть при критичному витіканні (рис. 2, крива 2).

Хоча процес розвантаження, як і завантаження, передбачає наявність двох етапів, в цілому його можна розглядати як поступове витікання газу з ємності. На першому етапі тиск середовища, куди витікає газ, буде рівний тиску в магістралі, а на другому — визначатиметься умовами всмоктування компресора. З метою мінімізації енергозатрат доцільним є поетапне введення в дію декількох компресорів.

Припустимо, що в початковий момент процес витікання газу з ємності відбувається у критичному режимі. Зі зменшенням тиску газу в ємності зменшується і масова витрата газу. Введення в дію компресора зумовить повернення процесу витікання у критичний режим, який згодом перейде у докритичний. При введенні в дію компресора наступної ступені стиснення відбуваються аналогічні зміни. Кількість таких повторень визначається кількістю незалежних ступеней стиснення. Момент введення в дію компресора визначається з врахуванням обмежень щодо тривалості процесу розвантаження. Мінімум тривалості процесу буде за умов відсутності докритичних режимів витікання газу. Тому, в ході

подальших досліджень розглянемо варіант існування тільки критичного режиму витікання газу за умов введення в дію двох незалежних ступеней стиснення.

Теоретичний підхід до вирішення поставленого завдання можливий на основі термодинаміки. Основне фізичне припущення, яке робиться в цьому випадку, полягає в тому, що процес витікання розглядається як квазі-стаціонарний, тобто передбачається, що в нескінченно малий проміжок часу витікання через вихідний отвір можна розглядати як стаціонарне. Для визначення миттєвої швидкості і витрати газу можна прийняти поточні значення тиску і температури газу. Точність результатів термодинамічного розв'язку і, в кінцевому підсумку, виправданість ідеї квазістаціонарної течії в основному залежить від швидкості зміни тиску в резервуарі з часом.

Процес витікання газу з ємності обмеженого об'єму описується схемою, зображеною на рис. 6, та залежностями (4) та (6) в наступному вигляді:

$$Q_m = f \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} P_1 \rho_1}, \quad (10)$$

$$Q_m = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (11)$$

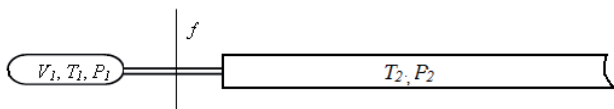


Рис. 6. Схема процесу спорожнення ємності вантажної системи

З використанням аналітичних залежностей, наведених у [9], встановлено динаміку зміни тиску при витіканні газу з балона об'ємом 28,872 м<sup>3</sup> через з'єднувальний трубопровід площею поперечного перерізу  $f = 0,000785 \text{ м}^2$  ( $d = 0,0316 \text{ м}$ ) за умов відсутності докритичних режимів витікання (рис. 7). При цьому середня швидкість витікання газу з окремої ємності становить 27,17 м<sup>3</sup>/с ( $2,35 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{добу}$ ).

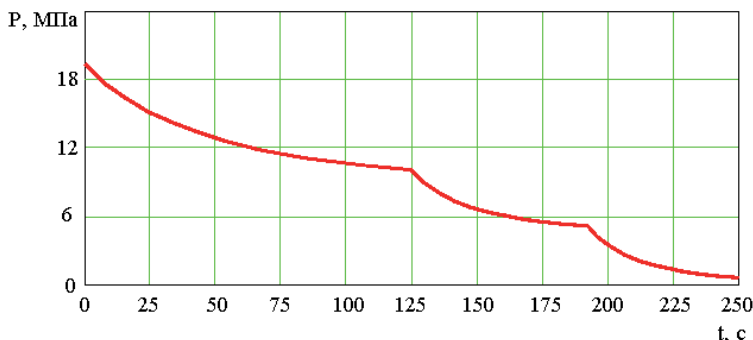


Рис. 7. Динаміка зміни тиску в балоні при витіканні газу

Аналогічна задача вирішена для умов витікання газу через трубопроводи різних діаметрів (рис. 8). Обчислення здійснені числовим методом з врахуванням методики наведеної у [13].

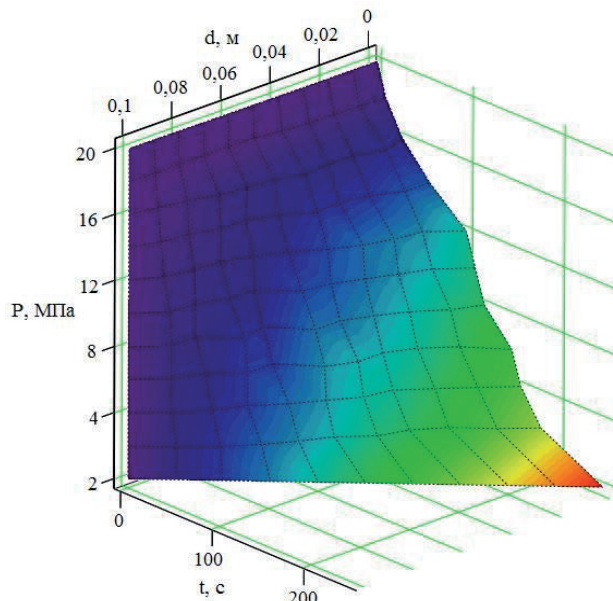


Рис. 8. Динаміка зміни тиску в балоні при витіканні газу через з'єднувальний трубопровід різного діаметра

## 6. Обговорення результатів дослідження перебігу процесів завантаження та розвантаження морських транспортних засобів

Таким чином, отримані результати досліджень можуть бути використані при проектуванні вантажних систем морських транспортних засобів для транспортування стиснутого природного газу. Також вони можуть слугувати за основу при комплектуванні окремих блоків за умов використання пропонувані світовими виробниками CNG модулів. З використанням опробованих алгоритмів можливим є обґрунтування режимів завантаження і розвантаження морських транспортних засобів відповідно до умов реалізації окремих проектів. В подальшому планується продовження досліджень зміни температури газу всередині балону впродовж його розвантаження за різних швидкостей та схем реалізації процесу.

## 7. Висновки

1. Аналіз особливостей процесів завантаження та розвантаження морських транспортних засобів показав, що вони можуть протікати у критичному і докритичному режимах. Процес розвантаження як при критичному, так і докритичному режимах супроводжується постійним зменшенням тиску в ємностях вантажної системи і відповідно маси газу, що витікає з них.

2. Встановлено, що при визначенні діаметрів з'єднувальних колекторів, за яких забезпечуються необхідні швидкості процесів завантаження, визначальними є параметри джерела газу. Підібрані з їх врахуванням колектори на кінцевому етапі забезпечують реалізацію процесів завантаження у докритичному режимі за умов мінімального перевищення тиску компресора над тиском заповнення ємності.

3. При використанні CNG модулів для комплектування вантажних систем морських транспортних засобів середня швидкість витікання газу з окремої ємності за умов підтримання докритичного режиму впродовж всього процесу становить  $27,17 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $2,35 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{добу}$ ). При цьому тривалість спорожнення ємності є меншою, ніж тривалість її заповнення через з'єднувальний трубопровід аналогічного діаметра.

#### Література

1. Stephen, G. CNG marine transport — demonstration project development [Electronic resource] / G. Stephen, G. Cano // Presented at the Offshore Technology Conference. — Houston, Texas, USA, 2006. — Available at: \www/URL: <http://dx.doi.org/10.4043/17780-MS>
2. ПАГЗ. Устройство [Электронный ресурс] / НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА». — Режим доступа: \www/URL: <http://www.lenprom.spb.ru/products/pagz/ustroystvo/>
3. About [Electronic resource] / KGTM Kelley GasTransportModules. — Available at: \www/URL: <http://kelleygtm.com/about/>
4. Передвижные авто газозаправщики (ПАГЗ) [Электронный ресурс] / ЗАО «ГазСервисКомпозит». — Режим доступа: \www/URL: <http://gassc.com/peredvizhnye-avtozapravshiki-pagz.html>
5. Судовая система для транспортировки сжатого газа [Электронный ресурс]: Патент РФ № 2145689, МПК F17C1/00, F17C5/00, F17C7/00 / Стеннинг Дейвид Дж. (СА), Крэн Джеймс Э. (СА), патентообладатель Энрон Эл-Эн-Джи Дивелопмент Корп. (US). — заявл. 28.10.1996, опубл. 20.02.2000. — Режим доступа: \www/URL: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2145689.html>
6. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом [Електронний ресурс]: Патент України № 67664, МПК F17C 5/00 / Патон Б. Є., Крижанівський Є. І., Савицький М. М., Швидкий Е. А., Зайцев В. В., Мандрик О. М.; заявник і патентоотримувач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. — № u201114580; заявл. 08.12.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 4. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/2-67664-sposib-transportuvannya-stisnutogo-prirodnogo-gazurukhomim-truboprovodom.html>
7. Джус, А. П. Дослідження умов експлуатації ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб [Текст] / А. П. Джус, О. М. Сусак // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2014. — № 5/7(71). — С. 25–30. doi:10.15587/1729-4061.2014.27995
8. Джус, А. П. Використання імітаційного моделювання для дослідження процесів заповнення суден CNG [Текст] / А. П. Джус, О. М. Сусак, Л. Є. Шкіца // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2014. — № 2/3(68). — С. 4–9. doi:10.15587/1729-4061.2014.23015
9. Курбатов, Е. С. Газодинамика процесса истечения из резервуаров со сжатыми газами [Текст] / Е. С. Курбатов // Молодой ученый. — 2014. — № 8. — С. 49–51.
10. Шейпак, А. А. Гидравлика и гидропневмопривод [Текст]. Ч. 1: Основы механики жидкости и газа: учебник / А. А. Шейпак. — 6-е изд., стереотип. — М.: МГИУ, 2007. — 264 с.
11. Герц, Е. В. Расчет пневмоприводов [Текст]: справочное пособие / Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. — М.: Машиностроение, 1975. — 272 с.
12. СНиП 2.05.06-85. Магистральные газопроводы [Текст] / Госстрой СССР. — М.: ЦИТИ Госстроя СССР, 1985. — 52 с.
13. Алексеев, Е. Р. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9 [Текст] / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова. — М.: НТ Пресс, 2006. — 496 с.

#### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ И РАЗГРУЗКИ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЖАТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Установлено, что при загрузке морских транспортных средств за счет давления источники газа, постоянная скорость обеспечивается в условиях протекания процесса в критическом режиме. Процесс разгрузки характеризуется постоянным уменьшением давления газа в емкостях и расхода газа, что вытекает из них. Максимальной скорости процессов достигается за счет поддержания критического режима путем поэтапного введения в действие компрессоров.

**Ключевые слова:** сжатый природный газ, процесс загрузки и разгрузки, режим течения, диаметр соединительного трубопровода.

*Джус Андрій Петрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра нафтогазового обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна, e-mail: andriy\_dzhus@i.ua.*

*Гриджук Ярослав Степанович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра теоретичної механіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна, e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com.*

*Джус Андрей Петрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра нефтегазового оборудования, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина.*

*Гриджук Ярослав Степанович, кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической механики, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина.*

*Dzhus Andriy, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine, e-mail: andriy\_dzhus@i.ua.*

*Gridzhuk Jaroslaw, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine, e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com*