У статті наведено результати досліджень зміни температури газу при заповненні ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб, для різних варіантів реалізації процесу. Встановлено, що особливою нерівномірністю температурні процеси характеризуються на вхідній ділянці в початковий період заповнення. Для глибшого аналізу наявних процесів необхідні подальші дослідження зміни температури газу при розвантаженні ємностей

Ключові слова: стиснутий природний газ, довгомірна труба, імітаційне моделювання, зміна температури газу

В статье приведены результаты исследований изменения температуры газа при заполнении емкостей, выполненных в виде длинномерных труб, для различных вариантов реализации процесса. Установлено, что особой неравномерностью температурные процессы характеризуются на входной области в начальный период заполнения. Для более глубокого анализа существующих процессов обходимо дальнейшие исследование изменения температуры газа при разгрузке емкостей

Ключевые слова: сжатый природный газ, длинномерная труба, имитационное моделирование, изменение температуры газа

УДК 622.691.4
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27995

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЄМНОСТЕЙ, ВИКОНАНИХ У ВИГЛЯДІ ДОВГОМІРНИХ ТРУБ

А. П. Джус
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра нафтогазового обладнання*
E-mail: andriy_dzhus@i.ua
О. М. Сусак
Кандидат технічних наук
Кафедра транспорту і зберігання нафти і газу*
E-mail: susak52@gmail.com
*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15,
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

1. Вступ

На сьогодні досвід транспортування газу в стиснутому стані починає накопичуватись в окремих куточках планети. Аргентинська фірма Galileo використовує газові контейнери високого тиску для газопостачання у ті віддалені райони держави, куди прокладати газопровід економічно недоцільно. Ця технологія отримала назву «Віртуальна труба» і показала дуже добрі практичні результати [1].

В той же час енергетична компанії Centrica, зареєстрована у Великобританії, планує першою у світі реалізувати на практиці проект поставок стиснутого природного газу (CNG) морським транспортом [2]. Використовувати судна CNG Centrica планує для поставок газу з Карибського острова Тобаго в Пуерто-Ріко і Домініканську Республіку для переведення місцевих електростанцій на газове паливо.

В якості можливих учасників проекту поставок стиснутого газу на суднах CNG спеціальної конструкції розглядаються дві компанії з Калгарі (Канада) – Grantech Engineering, що просуває технологію транспортування газу компанії Neptune Gas Technologies (NGT), і Sea NG – розробник і власник запатентованої технології морського транспортування стиснутого природного газу.

Neptune Gas Technologies (NGT) – це компанія, яка успадкувала всі напрацювання і активи в галузі технології CNG від компанії TransCanada. Для зберігання та транспортування CNG вона використовує сталеві ємності високого тиску із зовнішнім композитним підсиленням (CRPVs).

Sea NG в союзі з Marubeni Corp, Teekay і Enbridge просуває ідею морського транспортування стиснутого природного газу, використовуючи для цього встановлювані на борту судна спіралеподібні ємності великої місткості власної розробки (Coselle).

Загалом про морське транспортування CNG говорять вже протягом більше 10 років, але, незважаючи на ентузіазм розробників і велику кількість проектів, перше судно CNG досі не побудоване. З цього випливає, що при втіленні проектів морського транспортування CNG розробники зустрічаються з проблемами, які виникають на стадії реалізації проектів.

2. Літературний огляд та постановка проблеми

З метою виявлення можливих проблем при реалізації проектів та причин їх виникнення, проведемо короткий аналіз пропонованих конструкцій систем для транспортування стиснутого газу та, зокрема, ємностей для зберігання газу з оцінкою їх відповідності наявним технологічним процесам.

Відома система для транспортування стиснутого газу [3], що включає судно, у відсіках якого розташовані вертикально встановлені взаємопов'язані газові ємності. Газові ємності виконані зі сталевої труби з сферичними кришками на обох кінцях. У кожному відсіку міститься від 3-х до 30-ти взаємопов'язаних

© А. П. Джус, О. М. Сусак, 2014

ємностей, приєднаних до одного регулюючого клапана відсічним трубопроводом. У свою чергу, регулюючі клапани кожного відсіку проміжним трубопроводом з'єднані з головним трубопроводом, який містить засоби під'єднання до берегових терміналів. Проте зазначене судно має низку недоліків, серед яких постійне зменшення обсягу газу у газових ємностях внаслідок утворення всередині труб конденсату в процесі транспортування газу при зміні температури навколишнього середовища.

Усунення цього недоліка запропоноване в [4] шляхом виконання ємностей для зберігання стиснутого газу у вигляді пакета труб однакового діаметра, розташованих під кутом до горизонту і з'єднаних з висхідного кінця труб загальним колектором для закачування і відкачування газу, а з боку спадного кінця труб – загальним колектором для накопичення конденсату, що утворюється в трубах в процесі транспортування стиснутого газу.

Ще одним недоліком вказаної вище конструкції є складність взаємозв'язку між трубопроводами і системою клапанів за наявності великої кількості окремих ємностей на борту транспортного судна. При цьому не тільки ускладнюється конструкція, а й значно зростає вартість судна в цілому.

Альтернативним варіантом за необхідності транспортування значної кількості стиснутого газу є використання систем, що містять великі ємності, утворені бухтами згорнутої безперервної труби [5]. Застосування довгих відтинків труби для зберігання газу значно знижує витрати на спеціальну арматуру та спрощує процес їх заповнення. Безперервна труба вкладається в контейнері, який може виконувати декілька функцій: використовуватись в якості поворотного пристрою для навивки труби, служити засобом підйому та захисту від навколишнього середовища.

Ще один варіант системи зберігання газу, виконаної у вигляді безперервної труби, укладеної в контейнері, запропонований вітчизняними авторами. Згідно [6] спосіб морського транспортування стиснутого природного газу передбачає розташування ємностей з газом всередині стандартних морських контейнерів, які разом утворюють CNG-модулі, закріплені на морському транспортному засобі. Операції завантаження-розвантаження газу здійснюють через систему трубопроводів, які зв'язують CNG-модулі між собою і з пунктами завантаження або розвантаження. При цьому CNG-модулі залишають нерухомими і не переміщують з контейнеровоза на причал.

Автори [7] запропонували утворити трубопровід з послідовно з'єднаних модулів, розміри яких співпадають з розмірами морських контейнерів. Вони закріплюються на морському транспортному засобі і містять компактно розташовану стандартну довгомірну трубу високого тиску.

У запропонованих на сьогодні конструкціях враховувались різноманітні технологічні особливості притаманні транспортуванню стиснутого газу. Однак, однією з серйозних і малодосліджених проблем є поведінка елементів вантажної системи в процесі заповнення і зокрема при виконанні її у вигляді довгомірної труби високого тиску. Особливої актуальності це питання набуває зважаючи на можливу нерівномірність температури газу по довжині ємностей виконаних у вигляді довгомірних труб.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження перебігу процесів, які відбуваються в ємностях, виконаних у вигляді довгомірних труб, при їх заповненні.

Для досягнення цієї мети необхідно:

– встановити варіанти реалізації безпосередньо процесу заповнення ємностей газом та їх параметри;

– дослідити характер зміни температури газу на лінійних ділянках ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб, за різних параметрів процесу заповнення.

4. Дослідження зміни температури газу в процесі заповнення ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб та обговорення результатів

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень процесу заповнення ємностей, виконаних у вигляді циліндричного балона, авторами [8] встановлено, що зменшення температури газу внаслідок різкого його розширення присутнє в початковий нетривалий момент часу, а загальний вплив зменшення температури газу є таким, що не призводить до зменшення температури стінки ємності. В процесі подальшого заповнення ємності температура газу і, відповідно, стінок зростає, але не є однаковою по її довжині.

У роботі [9] авторами здійснено оцінку ефективності моделей, що базуються на використанні різних рівнянь стану газу, з метою прогнозування розподілу тиску, температури та витрати при заповненні газопроводу. Результати досліджень показали, що найбільше на точність моделі впливає коефіцієнт тертя, а вибір рівняння стану практично не має впливу на якість результатів.

Зважаючи на отримані у розглянутих роботах результати, використаємо для прогнозування розподілу температури по довжині ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб, методику, описану у [8].

Як базовий варіант для виконання теоретичних досліджень з використанням імітаційного моделювання розглянемо довгомірну трубу, придатну до монтажу на найпростішому морському транспортному засобі – баржі [10]. З врахуванням геометричних параметрів попередньо вибраної баржі та особливостей монтажу довгомірної труби встановлені основні її параметри. При цьому 15-ть лінійних ділянок, виконаних із труби діаметром 720 мм, з'єднуються колінами складеної конструкції із труб діаметром 620 мм. Довжина лінійної ділянки становить 30 м, а коліна по його осі – 1,26 м. Загальний вигляд частини ємності, виконаної у вигляді довгомірної труби, наведений на рис. 1.

В загальному випадку процесу заповнення ємностей вантажних систем суден CNG передують етапи збору газу та комплексної його підготовки (рис. 2). З врахуванням особливостей умов окремих проектів необхідно передбачати два варіанти реалізації безпосередньо процесу заповнення ємностей газом. За

наявності тиску джерела постачання газу значно більшого, ніж тиск «порожньої» ємності, перший етап заповнення відбувається без використання компресорів. По мірі вирівнювання тиску джерела газу і тиску в ємності, швидкість заповнення зменшується і виникає необхідність введення в дію компресорів. За малих тисків джерела постачання газу процес заповнення ємностей від початку реалізується з використанням компресорів. Тому в процесі досліджень необхідно розглядати обидва випадки.

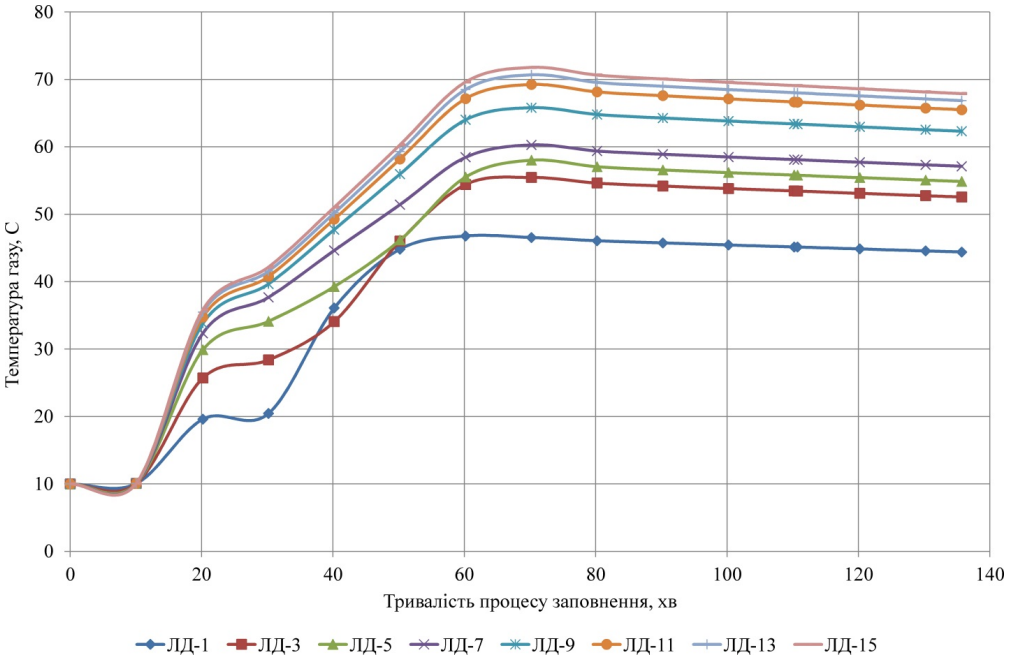

Рис. 3. Зміна температури газу по середині непарних лінійних ділянок (ЛД) довгомірної труби при її заповненні впродовж однієї години

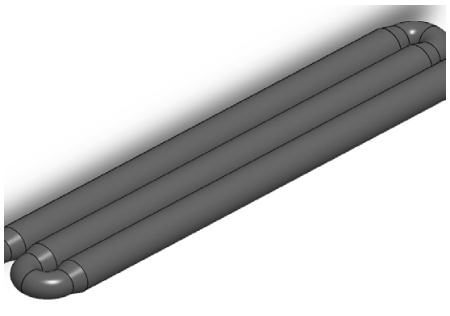

Рис. 1. Загальний вигляд частини ємності, виконаної у вигляді довгомірної труби

Також важливим моментом при заповненні ємності є безпосередньо тривалість процесу. Визначальним чинником при встановленні його тривалості є продуктивність джерела постачання газу. Тому нами розглянуто варіанти заповнення ємності, виконаної у вигляді довгомірної труби, впродовж 1, 3, 6 та 12 годин. Для умов її заповнення в два етапи (під тиском джерела газу і компресора), отримано результати, наведені на рис. 3–6.

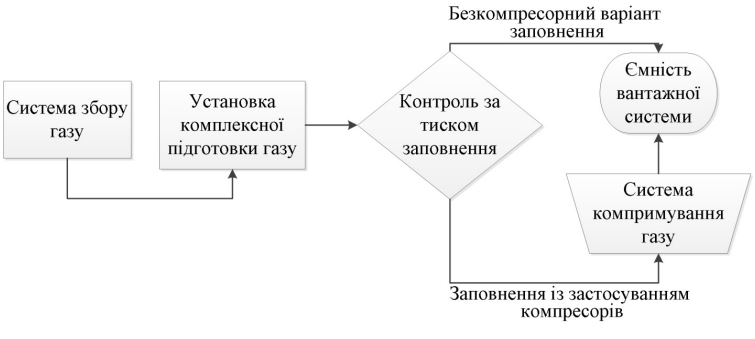

Рис. 2. Схема реалізації процесу підготовки газу та заповнення ємностей вантажних систем

Аналізуючи отримані результати слід зазначити, що характер зміни температури газу на відповідних лінійних ділянках є аналогічним для всіх розглянутих випадків. Окремої уваги заслуговує зміна температури на перших п'яти лінійних ділянках, а особливо першій-третій. Перетин графіків зміни температури засвідчує нерівномірність нагрівання газу, а отже і самих лінійних ділянок. Різниця температури газу на окремих ділянках довгомірної труби призводить до різних температурних видовжень. Підвищення температури газу в кінцевому результаті зумовлює зміну напружено-деформованого стану елементів ємності, яка заповнюється газом. Особливої уваги цей факт вимагає з огляду на паралельне розміщення окремих ділянок ємності для транспортування газу.

Наступні дослідження проведені для випадку заповнення ємності з використанням компресорів. З метою детального аналізу та подальшого визначення рівня впливу умов експлуатації на напружено-деформований стан окремих елементів, визначено температуру на середині кожної із 15-ти лінійних ділянок. Процес заповнення при цьому тривав протягом 6-ти годин. Для спрощення аналізу масив отриманих результатів наведено на рис. 7 у вигляді діаграми.

Аналізуючи подану інформацію необхідно відмітити, що стрімке підвищення температури в перші 30 хвилин присутнє на першій ділянці. Це підвищення спостерігається впродовж перших двох годин, а в подальшому температура практично стабілізується на певному рівні. В той же час температура газу на другій ділянці зростає менш інтенсивно і це зростання триває впродовж значно більшого періоду часу. Зниження інтенсивності зростання температури спостерігається ще на чотирьох лінійних ділянках. Усі

наступні ділянки характеризуються практично однаковою інтенсивністю зростання температури, що підтверджується залежностями, наведеними на рис. 8.

Для детальнішого аналізу особливостей зміни температури газу на першій і другій лінійних ділянках довгомірної труби на рис. 9 наведено залежності, що характеризують зміну температури газу на середині вказаних ділянок у процесі її заповнення.

Як бачимо в початковий момент заповнення температура газу на середині першої лінійної ділянки є вищою на 6 °С, ніж на середині другої. Впродовж другої години заповнення ця різниця зменшується до нуля. В подальшому спостерігається інтенсивніше збільшення температури газу на середині другої ділянки, а їх різниця в кінцевий момент заповнення знову досягає 6 °С. За таких умов суміжні лінійні ділянки зазнають впливу різних температурних навантажень, що в кінцевому результаті створює додаткові навантаження на елементи їх з'єднання.

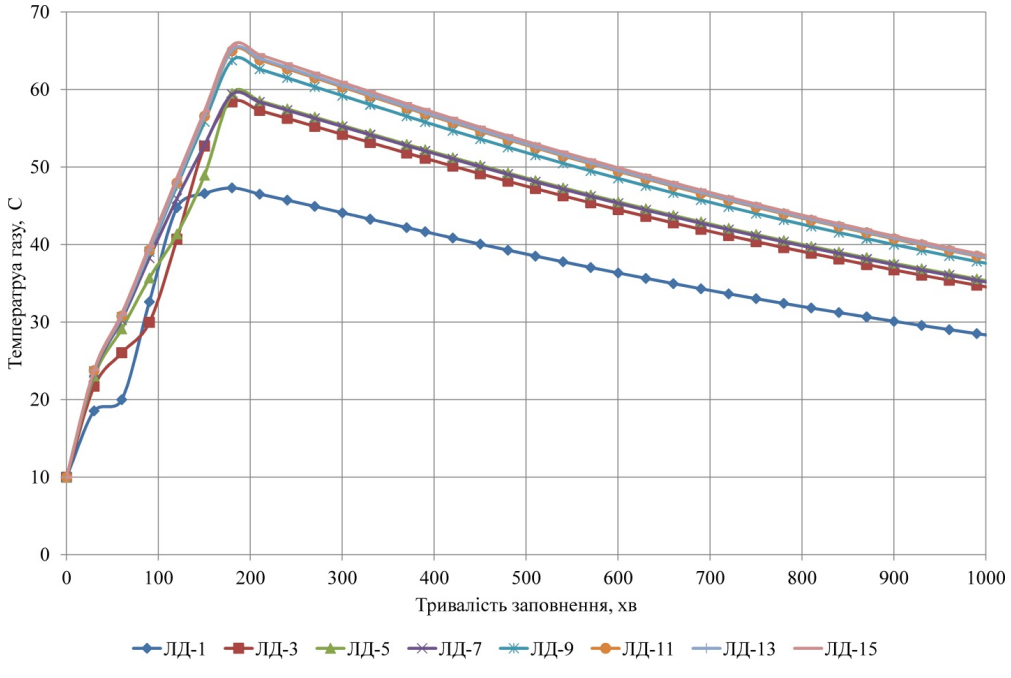

Рис. 4. Зміна температури газу по середині непарних лінійних ділянок (ЛД) довгомірної труби при її заповненні впродовж трьох годин

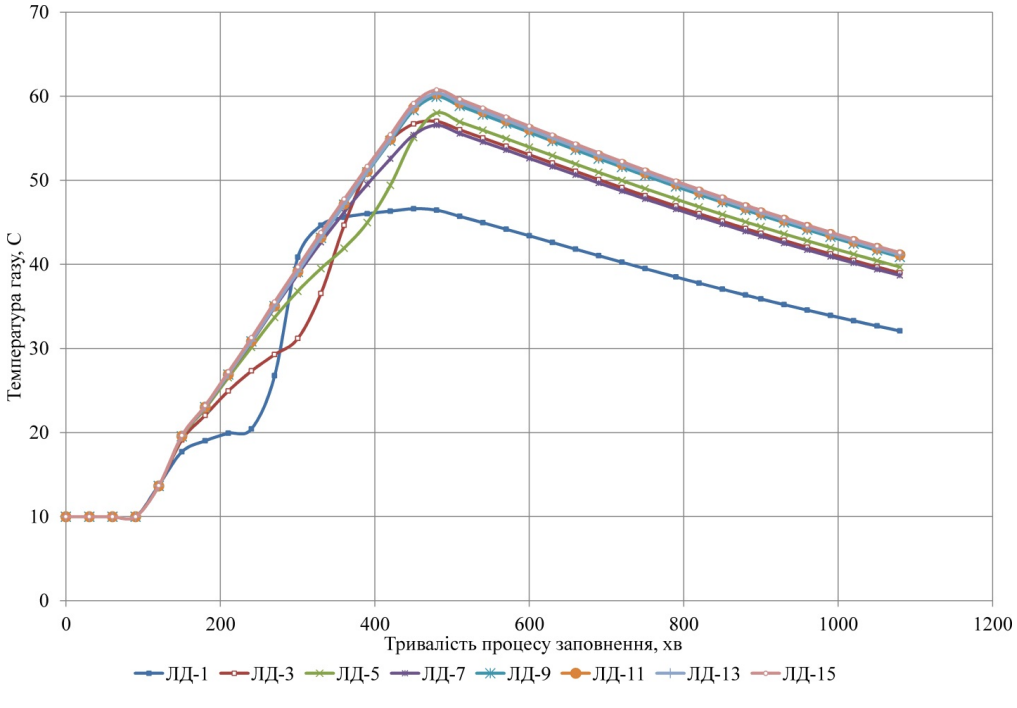

Рис. 5. Зміна температури газу по середині непарних лінійних ділянок (ЛД) довгомірної труби при її заповненні впродовж шести годин

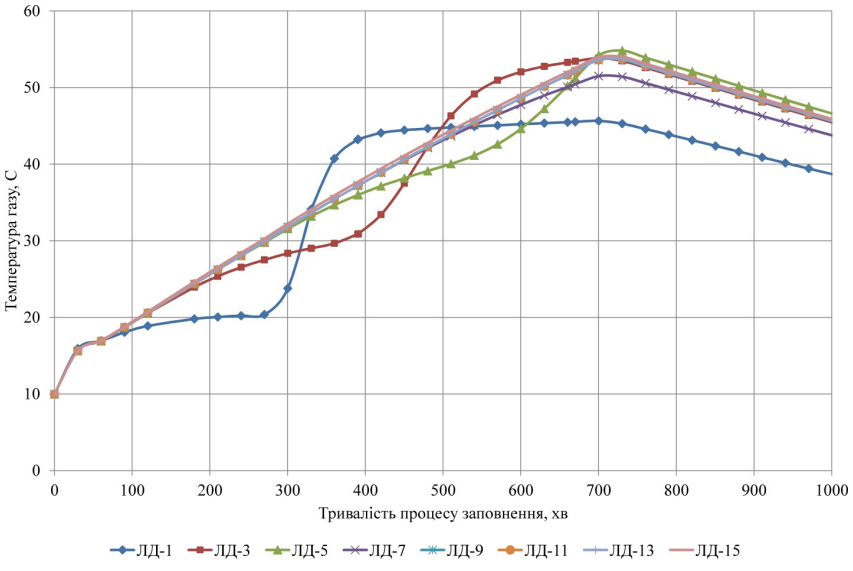

Рис. 6. Зміна температури газу по середині непарних лінійних ділянок (ЛД) довгомірної труби при її заповненні впродовж дванадцяти годин

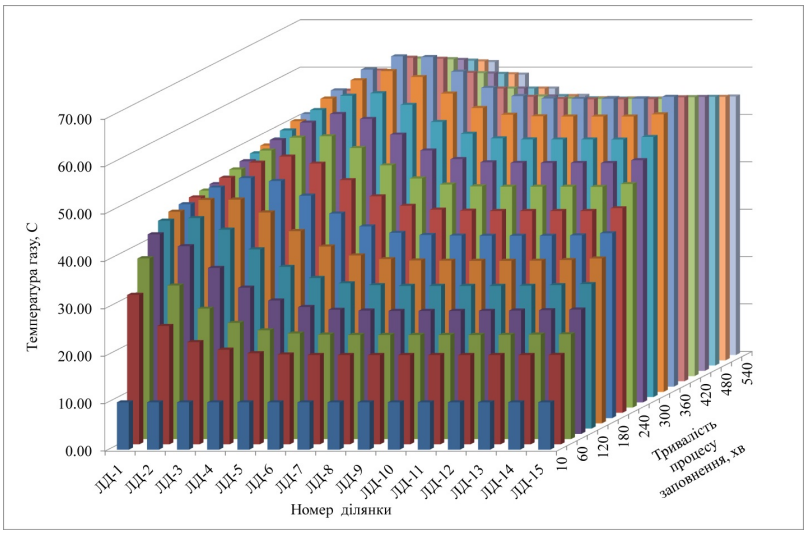

Рис. 7. Зміна температури газу на лінійних ділянках довгомірної труби в процесі її заповнення впродовж 6-ти годин

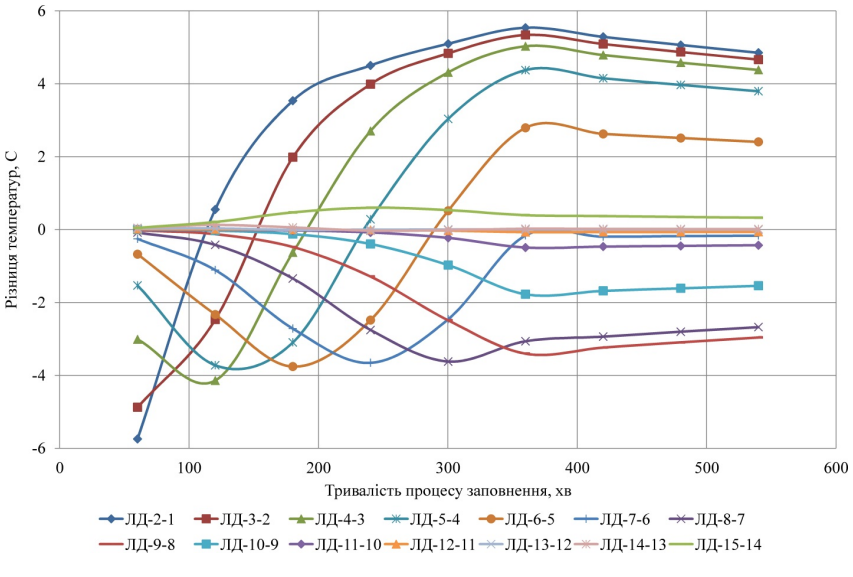

Рис. 8. Зміна різниці температури газу на суміжних лінійних ділянках довгомірної труби в процесі її заповнення впродовж 6-ти годин

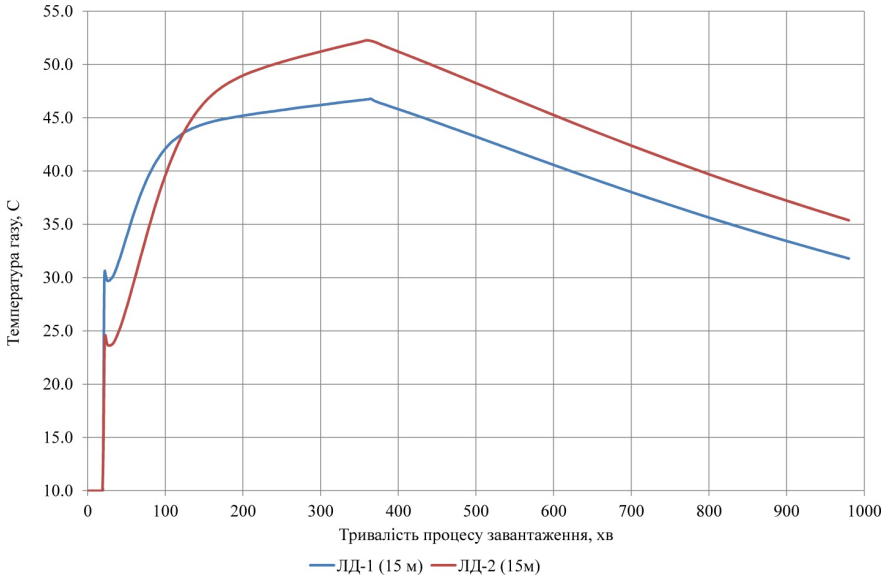

Рис. 9. Залежність температури газу на середині першої та другої лінійних ділянок від часу заповнення

6. Висновки

За результатами досліджень перебігу процесів, які відбуваються в ємностях, виконаних у вигляді довгомірних труб, встановлено, що для умов їх заповнення в два етапи особливою нерівномірністю характеризується температура на перших трьох лінійних ділянках. Введення в дію компресора призводить швидкого зростання температури газу на першій, а в подальшому, і на другій лінійній ділянці. Різниця температур на середині цих ділянок досягає 12 °С. Характер нерівномірності за різних швидкостей реалізації процесу є практично аналогічним.

Для умов заповнення ємності з постійним використанням компресора особливо вираженою нерівномірністю температурні процеси характеризуються на початкових етапах. Максимальна різниця температур на середині суміжних ділянок досягає 6 °С. Зі збільшенням тиску газу температурні процеси частково стабілізуються.

Для можливості подальших досліджень впливу наявних процесів на напружено-деформований стан елементів довгомірної труби необхідними є детальні дослідження зміни температури газу по довжині початкових лінійних ділянок як при заповненні, так і розвантаженні ємностей.

Література

1. Galileo Technologiees [Electronic resource] / Available at: http://www.galileoar.com/ru/
2. CNG INTARI [Electronic resource] / Available at: http://cng.intari.com/informatsija/novosti/dejjstvitelno-pervyjj-v-mire-proekt-cng-ili-ocherednojj-falstart/
3. Патент № 2145689 РФ, МПК F17C001/00, F17C005/06, F17C007/00. Судовая система для транспортировки сжатого газа [Текст] / Стеннинг Д. Дж., Крэн Д. Э. – № 98110263; заявл. 28.10.1996; опубл. 20.02.2000, Бюл. № 3.– Режим доступа: http://www.freepatent.ru/patents/2145689
4. Патент № 2300480 РФ, МПК B63B25/14, F17C1/00, F17C5/06. Судно для транспортировки сжатого газа [Текст] / Блинков А. Н., Власов А. А., Лицис А. В. – №2005129647/11; заявл. 22.09.2005; опубл. 10.06.2007, Бюл. № 16. – Режим доступа: http://www.freepatent.ru/patents/2300480
5. Патент № 2155696 РФ, МПК B63B25/14. Судовая система транспортировки газа [Текст] / Стеннинг Д. Дж., Крэн Д. А. – № 99101831/28; заявл. 26.09.1997; опубл. 10.09.2000, Бюл. № 27. – Режим доступа: http://www.sibpatent.ru/patent.asp?nPubl=2155696&mpkcls=B63B025&ptncls=B63B025/14&sort=2
6. Деклараційний патент на корисну модель № 42694 Україна, МПК B67D 5/00, F17C 1/00. Спосіб морського транспортування стиснутого природного газу в CNG-модулях [Текст] / Крижанівський Є. І., Зайцев В. В., Зайцев Вал. В., Зайцев Д. В. – № u200903996; заявл. 23.04.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13.
7. Деклараційний патент на корисну модель № 67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом [Текст] / Патон Б. Є., Крижанівський Є. І., Савицький М. М., Швидкий Е. А., Зайцев В. В., Мандрик О. М. – № u201114580; заявл. 08.12.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 4.
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. – Т. 2, № 3(68). – С. 4–9. doi:10.15587/1729-4061.2014.23015.
9. Ebrahimzadeha, E. Simulation of transient gas flow using the orthogonal collocation method [Text] / E. Ebrahimzadeha, M. N. Shahrakb, B. Bazooyar // Chem. Eng. Res. Des. – 2012. – Vol. 90. – P. 1701–1710. doi:10.1016/j.cherd.2012.02.018.
10. Крижанівський, Є. І. Техніко-економічні аспекти транспортування природного газу із морських родовищ [Текст] / Є. І. Крижанівський, О. Г. Дзьоба, А. П. Джус, Ю. В. Міронов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2013. – № 2(35). – С. 7–15.