

УДК 622.691.4

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ РОЗВАНТАЖЕННЯ CNG СУДЕН У ІСНУЮЧІ ГАЗОТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

О. М. Сусак

ІФНТУНГ; 15, вул. Карпатська, м. Івано-Франківськ, 76019.
тел. +380342242166.e-mail: tzng@nung.edu.ua

Проведено розрахунки режимів розвантаження CNG судна. Запропоновано принципову технологічну схему розвантаження, до якої входять вузли підключення берегових комунікації до CNG судна, станція розвантажування та буферний трубопровід, який дозволяє подати газ в існуючу ГТС. Здійснено математичне моделювання режимів розвантаження з використанням загальновідомих залежностей газової динаміки. Встановлено, що процес розвантаження судна проходить у два етапи з тривалістю 2?2,5 годин – першого та 10?11 годин – другого етапів. Загальна тривалість процесу розвантаження із урахуванням всіх операцій із заходження і виходу судна з порту, швартування, під'єднання та роз'єднання комунікації складає 24 години, що відповідає вимогам техніко-економічних розрахунків. В процесі розвантаження судна виділено три фази нестационарних режимів руху газу тривалістю 30-35 хвилин кожна.

Ключові слова: CNG судно, математичне моделювання режимів руху газу, газова динаміка, нестационарні процеси

Проведен расчет режимов разгрузки CNG судна. Предложена принципиальная технологическая схема разгрузки, включающая узел подключения береговых коммуникации к CNG судну, станцию разгрузки и буферный трубопровод, для подачи газа в существующую ГТС. Проведено математическое моделирование режимов разгрузки с использованием общеизвестных зависимостей газовой динамики. Установлено, что процесс разгрузки судна является двухэтапным продолжительностью 2?2,5 часов – первого и 10?11 – второго этапов. Длительность процесса разгрузки с учетом всех операции по заходу и выходу судна из порта, швартовке, подключению и отключению коммуникации составляет 24 часа, что соответствует требованиям технико-экономических расчетов. При разгрузке судна выделено три фазы нестационарных режимов движения газа продолжительностью 30-35 минут каждой.

Ключевые слова: CNG судно, математическое моделирование режимов движения газа, газовая динамика, нестационарные процессы

In this paper, calculations of the regime of discharging CNG vehicles were made. The basic flow sheet discharging was presented, which includes the coastal communication, connectivity to CNG ship, unloading station and buffer pipeline, which allows supply gas to the existing gas transportation system. The work carried out mathematical modeling discharging modes using commonly known dependencies of gas dynamics. The process of discharging takes place in two stages playing 2 ? 2,5 hours first and 10 ? 11 the second phase. Duration of the process of discharging including all operations call and departure the vessel, mooring, connection and disconnection of communication reaches 24 hours, subject to the technical and economic calculations. In the process of discharging the vessel, there are three phases of nonstationary regimes of the gas phase with duration of non-stationary in 30-35 minutes each.

Keywords: CNG ship, mathematical simulation regimes of the gas, gas dynamics, non-stationary processes

Спосіб транспортування природного газу морським шляхом у стиснутому (CNG) вигляді на спеціальних судах має значні перспективи у диверсифікації джерел надходження енергоносіїв на територію України. Однак такий вид транспорту вимагає детального розгляду режимів розвантаження та завантаження CNG судна виходячи із особливості будови судна та прилеглої газотранспортної системи (ГТС).

Технологія транспортування природного газу в стисненому стані на спеціальних судах отримало назву CNG технології. Основним елементом судна CNG є транспортна система, що за-

безпечує завантаження – розвантаження природного газу, його попередню підготовку, стиснення та перевезення в ємностях під тиском. Дана технологія вже була випробувана в США в 1960-і роки [1], [2]. Проте, станом на той час, ця спроба була визнана невдалою, особливо з урахуванням великих відстаней до газonosних регіонів. Не дивлячись на зміни у стратегії транспорту газу, збільшення віддалів від газonosних регіонів та зміна загального енергетичного балансу у ряді розвинутих країн CNG технології поки що не мають практичного втілення, хоча повідомлялось про будівництво CNG-газовозів в Норвегії, Південній Кореї і Російській федерації уже в 2011-2012 роках.

Науковцями України було запропоновано технологію транспортування стисненого природного газу на судах-контейнеровозах, які обладнані стандартними 40 футовими морськими контейнерами, що містять ємності для зберігання стиснутого газу [3, 4]. Однак для забезпечення економічної рентабельності такого проекту слід чітко з'ясувати особливості режимів розвантаження таких суден.

Запропонована технологія транспорту передбачає перевезення природного газу під тиском в 20-25 МПа, однак, в існуючій ГТС України, максимальний робочий тиск сягає 7,5 МПа (для транзитних експортних магістральних газопроводів великого діаметру) та 5,6 МПа (для магістральних газопроводів меншого діаметру). Значна різниця тиску між CNG судном та існуючою ГТС України вимагає відповідних технологічних рішень по режимах розвантаження. Окрім цього виходячи із особливостей запропонованого способу транспортування для розвантаження слід обрати такі режими за яких би повне розвантаження судна відбувалося протягом 12-15 год. Операції, що пов'язані із заходом та виходом судна з порту, швартування та приєднання комунікацій повинні тривати не більше 9 годин, при цьому в загальному цикл розвантаження CNG судна повинен тривати не більше 24 год.

Отже фактично процес розвантаження судна бути достатньо швидкоплинним із значними змінами тиску, температури та швидкості природного газу. Враховуючи наявність ряду технологічних та конструктивних обмежень ГТС слід чітко визначитися із граничними значеннями вище перерахованих параметрів під час процесу розвантаження судна.

Основним завданням даної роботи є розробка принципової технологічної схеми розвантаження та визначення основних режимних параметрів спільної роботи CNG судна та прилеглої ГТС. Окрім цього слід визначити тривалість окремих етапів розвантаження.

Для забезпечення вимог по розвантаженню CNG судна розроблена принципова схема для умов півдня України. Принципова технологічна схема включає в себе такі елементи:

- чотири нитки підключення із CNG судном (DN 700) із крановими вузлами та байпасними лініями із максимальним робочим тиском в 20 МПа;
- станція розвантаження, що обладнана електропривідними ГПА із універсальною обв'язкою, із можливістю одно-, дво- та трьох ступеневого стиску, загальною продуктивністю в 25 млн.м³/д;
- буферний трубопровід (DN 1400) із робочим тиском 10 МПа та довжиною до 90 км для з'єднання зони розвантаження судна із існуючою ГТС;
- станція редукування газу для з'єднання буферного трубопроводу із існуючою ГТС, що обладнана системами зниження тиску газу на базі турбодетандерних установок. Параметри установок (діапазон початкового тиску від 5,6 до 10 МПа), кінцевий тиск від 5,6 до 4,0 МПа. Загальна продуктивність турбодетандерних установок – 20 млн.м³/д.

Значна кількість вузлів підключення зумовлена необхідністю швидкого вирівнювання тиску між CNG судном та вузлом підключення буферного трубопроводу на узбережжі, наявність буферного трубопроводу та станції розвантаження дозволить за встановлений час (12-14 годин) провести операції по повному вивантаженню судна. Окрім цього слід відмітити, що в зоні можливого розташування станції розвантаження повинна бути достатньо розвинута інфраструктура ГТС для прийому такої кількості природного газу. В разі відсутності можливості використання існуючої системи пропонується будівництво нової нитки газопроводу із робочим тиском 10 МПа. Для редукування тиску із буферного трубопроводу в існуючу систему передбачено комплекс турбодетандерних установок, які окрім зниження тиску до заданої величини будуть виконувати роль генераторів електричної енергії. Зона розміщення такої станції повинна визначитися відповідно до детальних техніко-економічних розрахунків.

Цикл розвантаження судна був поділений на два етапи. Етап перший:

– під'єднання CNG танкера із береговими комунікаціями та перепуск газу через кранові вузли у буферний трубопровід із дотриманням максимально допустимого тиску в системі.

Етап другий

– включення в роботу станції розвантаження та остаточне розвантаження судна CNG у буферний трубопровід.

Розрахунок проводився із використанням двох параметричного рівняння стану Соаве-Редліха-Квонга, яке дозволяє із достатньою точністю описувати реальні гази у потрібному діапазоні тисків та температур [5]. Моделювання термодинамічних властивостей газу проводилося виходячи із рівняння стану газу та математичних моделей [6].

Моделювання режиму розвантаження проводилося за таких вихідних даних. Початковий абсолютний тиск газу у CNG судні 20 МПа, кінцевий мінімальний тиск повинен лежати в межах від 0,3 до 0,5 МПа, загальна ємність CNG судна становить 20 млн.м³ природного газу за стандартних умов. Початковий абсолютний тиск газу в буферному трубопроводі 5 МПа. За умов циклічної роботи системи по завершенню процесу розвантаження судна тиск газу в буферному трубопроводі повинен бути в межах 5 МПа. На початку процесу розвантаження температура газу в CNG судні становить 25 °С (за умов літнього періоду роботи системи та відсутності примусового охолодження CNG модулів), у буферному трубопроводі становить 10 °С (за умов першого циклу розвантаження судна).

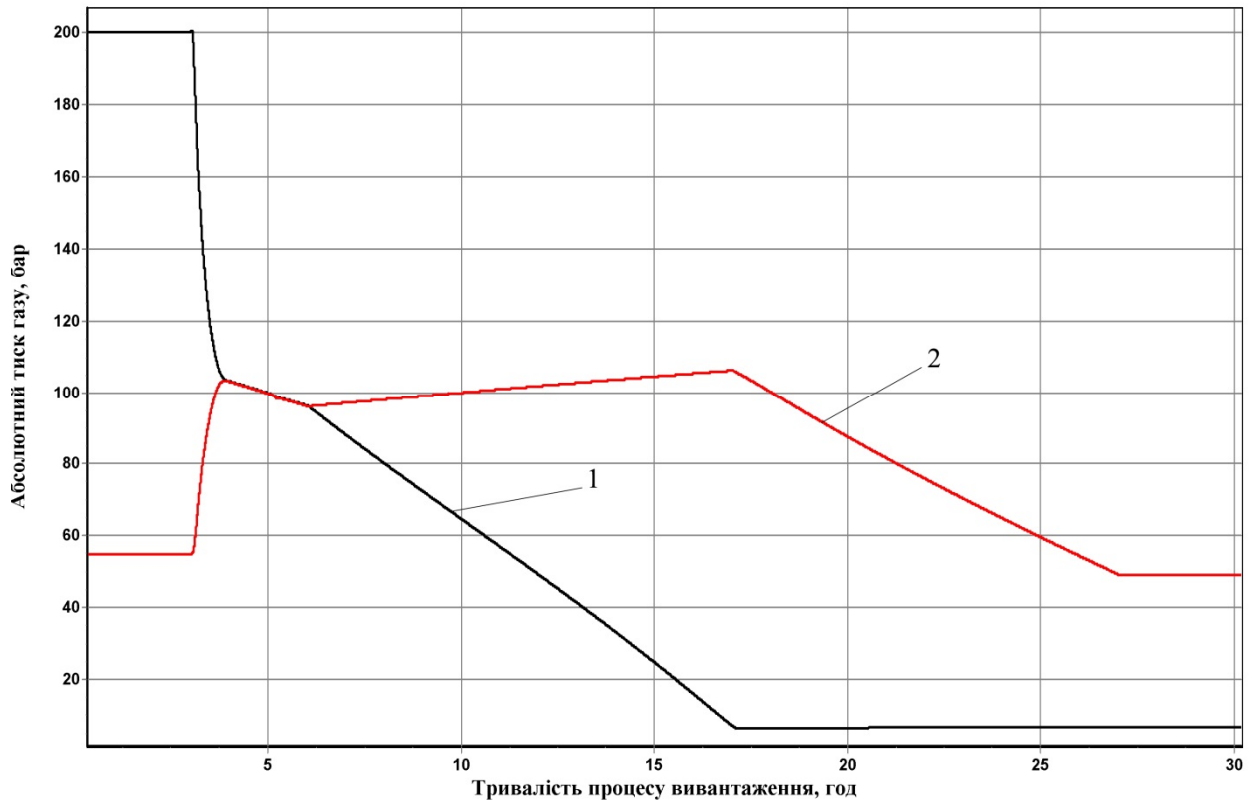
Розрахунок режиму розвантаження проводився в два етапи. Етап перший передбачав здійснення технологічних операцій по з'єднанню берегових комунікації до CNG судна, перепуск газу через байпасні та основні крани в буферний трубопровід з метою вирівнювання тиску. На даному етапі особливу увагу приділялося визначенням параметрів газового потоку у зоні під'єднання газопроводів.

Другий етап розвантаження передбачав включення в роботу станції розвантаження, примусову подачу природного газу в буферний трубопровід з дотриманням технологічних обмежень надалі передбачає зупинку станції розвантаження, та поступове зниження тиску у буферному трубопроводі до початкового значення. Загальний цикл повинен тривати не більше 24 годин. Основну увагу на цьому етапі приділялося визначенню параметрів роботи системи в цілому, а також визначенню тривалості фази нестационарних процесів в моменти запуску та зупинки станції розвантаження.

Виходячи із вище викладеного було розраховано режими розвантаження CNG судна із визначенням основними режимних параметрів роботи системи, а саме динаміки зміни робочого тиску, температури, швидкості руху, масової та об'ємної витрати за стандартних умов газу. Моделювання проводилося методом кінцевих елементів виходячи із закону збереження енергії у механічній формі запису, двох параметричного рівняння стану та закону збереження масової витрати.

Відповідно до проведеного моделювання тривалість першого етапу становить 2?2,5 години, тривалість другого етапу 10?11 години. На рисунку 1 представлена графічна залежність зміни тиску в CNG судні та в буферному газопроводу впродовж процесу розвантаження судна. Виходячи із особливості процесу моделювання розвантаження відлік часу слід розпочинати третьої години (впродовж першої фази моделювання відбувається перше наближення розрахункової моделі за методом кінцевих елементів

На рисунку 2 представлена графічна залежність зміни температури газу впродовж процесу розвантаження судна. Слід відмити значне падіння температури впродовж першого етапу. Виходячи із результатів моделювання перший етап характеризується зменшенням температури у CNG судні на 30?35 °С за достатньо короткий часовий проміжок, що слід урахувати під час механічних розрахунків на міцність та пластичні деформації. Дані результати свідчать про можливість виникнення суттєвих температурних напружень у тілі труби впродовж процесу розвантаження. На рисунку 3 наведена залежність зміни температури газу впродовж перших десяти хвилин перепуску газу з CNG судна у буферний трубопровід. За результатами моделювання можна зробити висновок, що у перші хвилини роботи значне температурне навантаження може виникати і у зоні під'єднання буферного трубопроводу, температурний перепад при цьому сягає приблизно 20 °С протягом 2 хвилин.



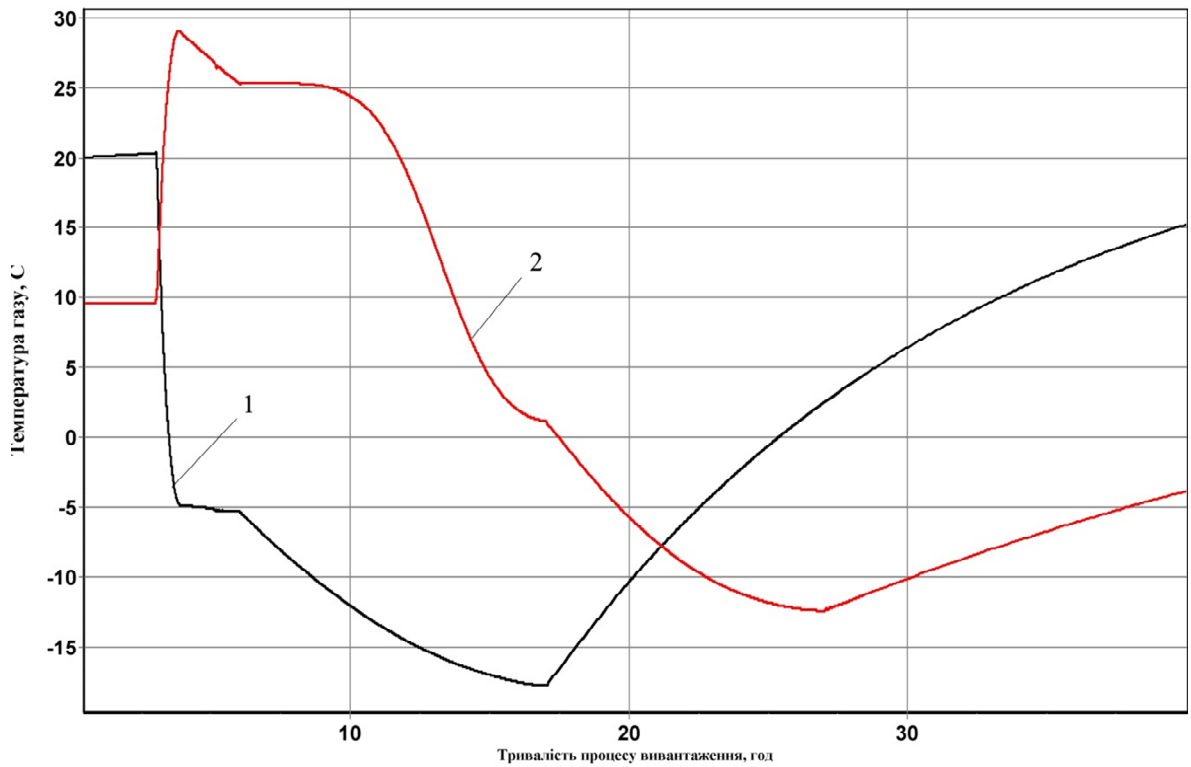
1 – абсолютний тиск в CNG судні ; 2 – абсолютний тиск у буферному трубопроводі

Рисунок 1 – Динаміка зміни абсолютного тиску в системі впродовж процесу розвантаження CNG судна

На рисунку 4 представлено зміну масової витрати газу у CNG судні та буферному трубопроводі впродовж всього процесу розвантаження судна. Слід відмітити наявність значних періодів нестационарного режиму роботи системи. Ці періоди характеризуються значними коливаннями масової витрати та швидкості газу. На рисунку 5 представлено динаміку зміни швидкості руху газу впродовж всього циклу розвантаження.

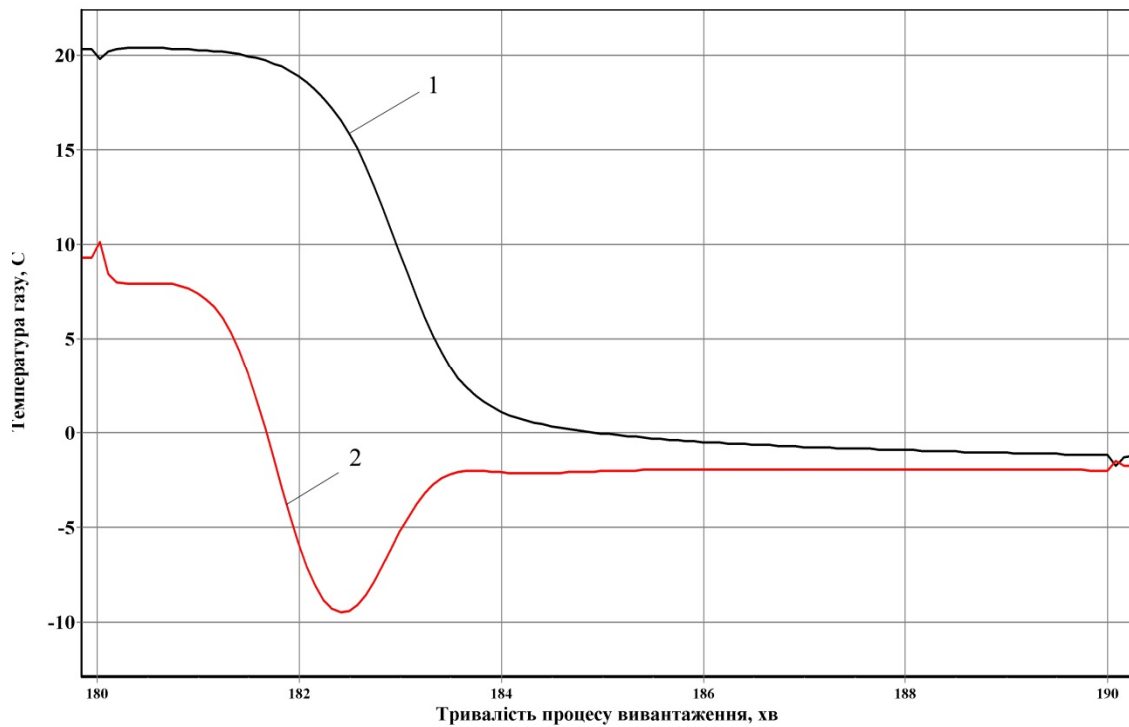
Як видно з рисунку 4 та 5 всього спостерігається три етапи нестационарних режимів роботи. Тривалість кожного коливається в межах від 30 до 35 хв. Перша фаза нестационарності пов'язана із відкриттям байпасних та основних кранів комунікації під час перепуску газу із CNG судна в буферний трубопровід. Друга фаза нестационарності виникає у момент включення станції розвантаження та триває приблизно 40 хвилин до стабілізації режиму перекачування. На рисунку 6 представлено результати моделювання фази запуску станції розвантаження. Третя фаза нестационарності процесу розвантаження виникає у момент зупинки станції розвантаження та перекриття основних кранів комунікації і від'єднання CNG судна у зв'язку із завершенням технологічних операцій.

На рисунку 7 представлено результати розрахунку динаміки зміни швидкості руху газу впродовж перших 10 хвилин роботи системи. Слід відмітити значне збільшення швидкості руху газу в момент відкриття основних кранів системи. Так швидкість руху газу у зоні під'єднання у буферному трубопроводі сягає 52-52м/с, а у трубопроводах CNG судна 34-35м/с. Ці величини перевищують максимально допустимі швидкості руху газу у магістральних газопроводах, однак у зв'язку із короткою тривалістю такого режиму роботи (7-8 хвилин) таке перевищення допустимо, слід наголосити що таке суттєве короткотривале збільшення швидкості треба врахувати при проведенні аналізу динамічного навантаження на елементи конструкції трубопроводів CNG судна.



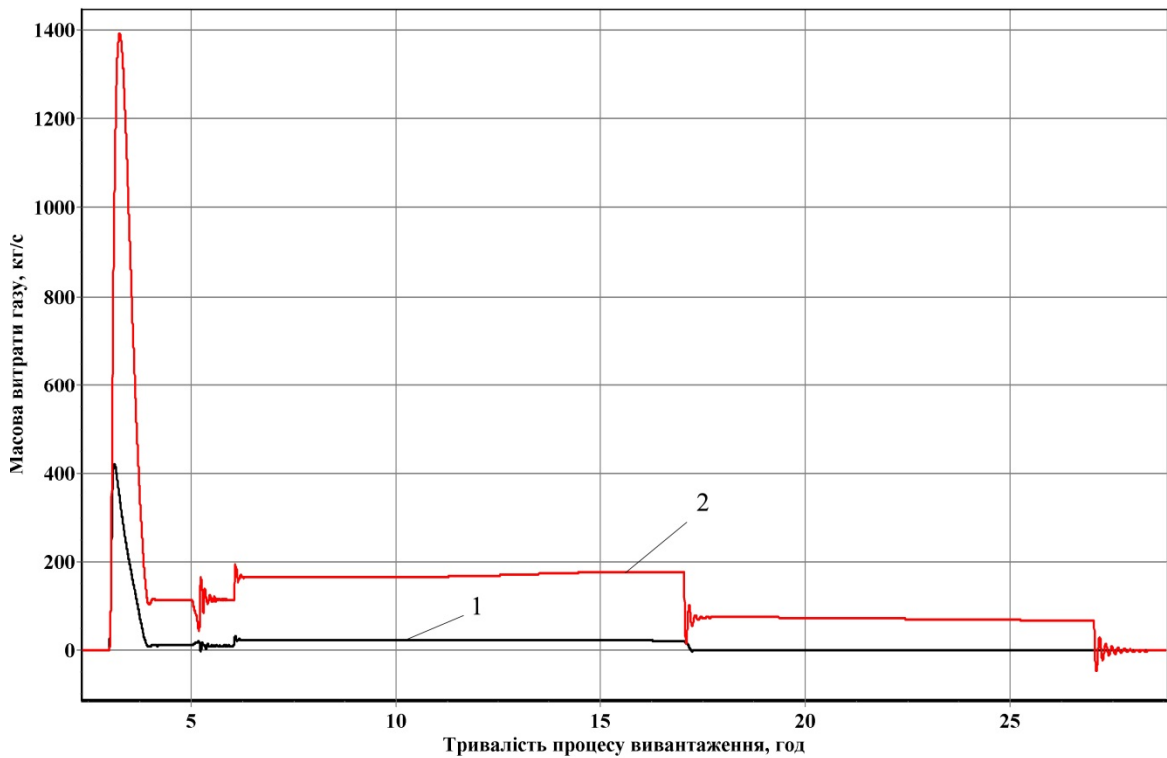
1 – температура в CNG судні ; 2 – температура у буферному трубопроводі

Рисунок 2 – Динаміка зміни температури в системі впродовж процесу розвантаження CNG судна



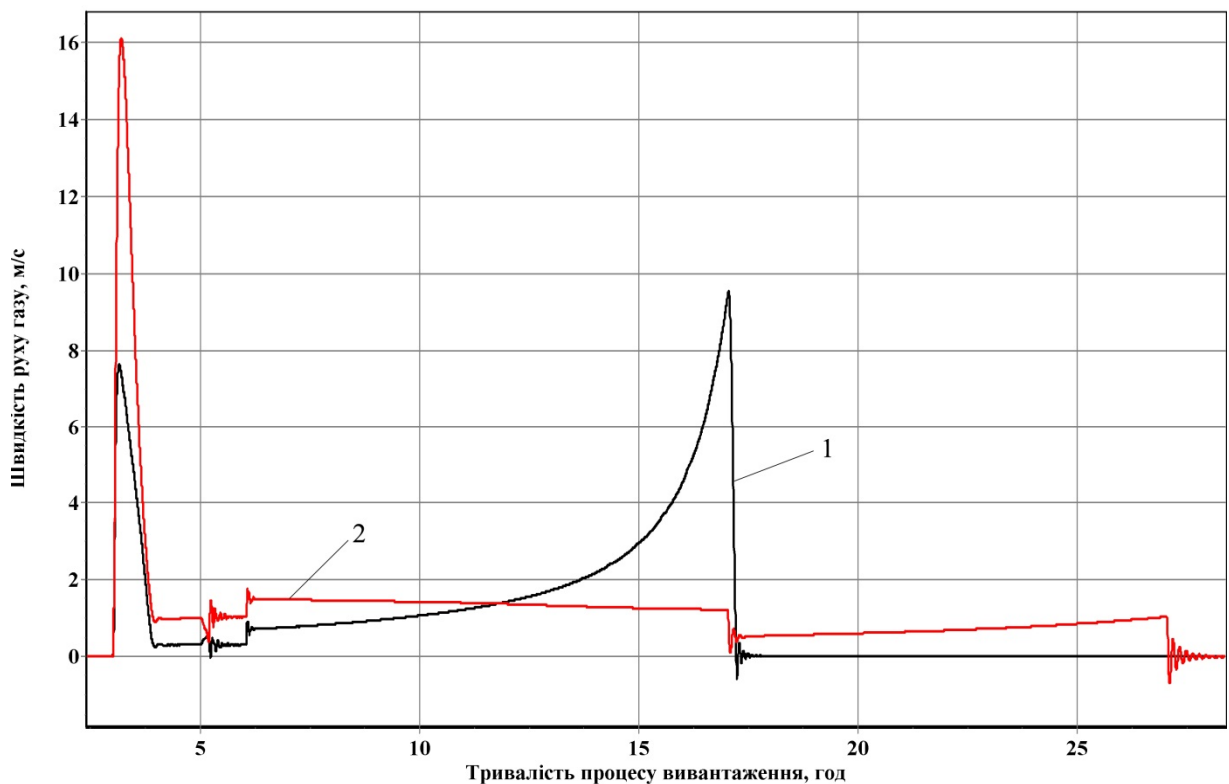
1 – температура газу в CNG судні ; 2 – температура газу у буферному трубопроводі

Рисунок 3 – Динаміка зміни температури газу в системі впродовж перших 10 хвилин розвантаження CNG судна



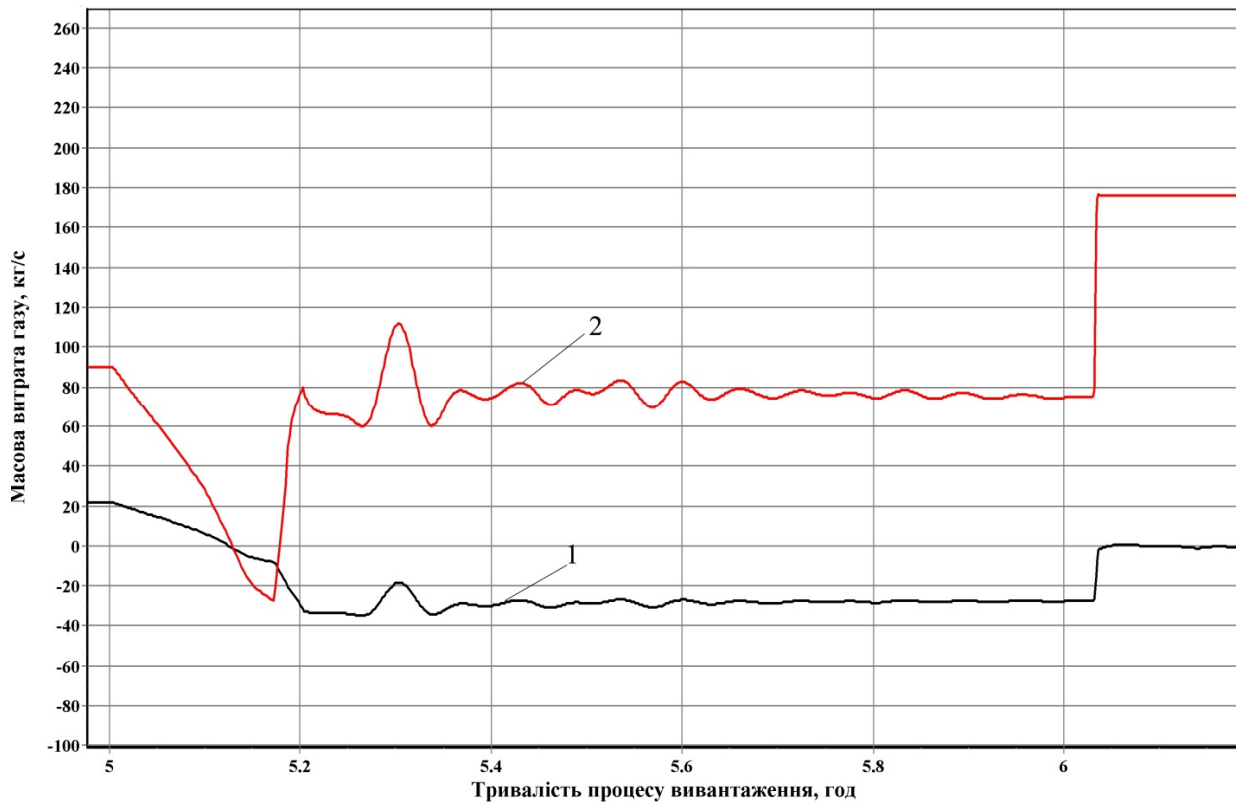
1 – масова витрата газу в CNG судні ; 2 – масова витрата газу у буферному трубопроводі

Рисунок 4 – Динаміка зміни масової витрати газу в системі впродовж процесу розвантаження CNG судна



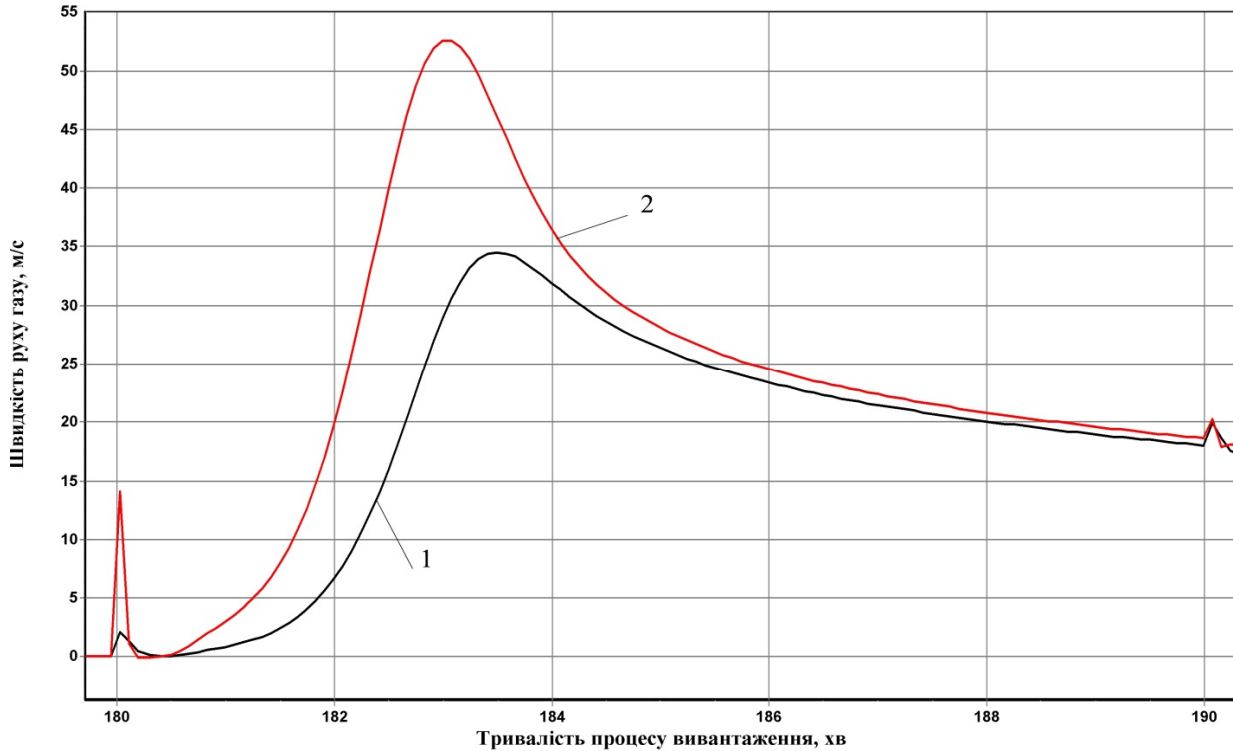
1 – швидкість газу в CNG судні ; 2 – швидкість газу у буферному трубопроводі

Рисунок 5 – Динаміка зміни швидкості газу в системі впродовж всього періоду розвантаження CNG судна



1 – масова витрата газу в CNG судні ; 2 – масова витрата газу у буферному трубопроводі

Рисунок 6 – Динаміка зміни масової витрати в системі впродовж періоду запуску станції розвантаження



1 – швидкість газу в CNG судні ; 2 – швидкість газу у буферному трубопроводі

Рисунок 7 – Динаміка зміни швидкості газу в системі впродовж перших 10 хвилин розвантаження CNG судна

За результатами математичного моделювання режимів розвантаження CNG судна можна зробити висновок про те, що запропонована технологічна схема дозволить у встановлений часовий проміжок (24 години) здійснити технологічні операції по вивантаженню стиснутого природного газу із систем CNG судна. Процес розвантаження природного газу буде відбуватися у два етапи тривалістю 22,5 годин перший та 10,11 год другий етап. Протягом етапів розвантаження спостерігаються три фази нестационарних режимів руху газу із тривалістю фази нестационарності в 30-35 хвилин кожна. Результати математичного моделювання режиму розвантаження CNG судна повинні бути використані при аналізі динамічного навантаження на елементи конструкції трубопроводів CNG судна.

Література

1. Пронин Е.Е. Морская транспортировка газа / Е.Е.Пронин, С.Е.Поденок. // – Ленформ. бюл. ОАО Газпром. – 2004. – №1 (15).
2. Данилова С.А. Основные проблемы проектирования и постройки судов- метановозов / С.А.Данилова // Судостроение. – 1974. – № 4. – С. 5-12.
3. Пат. 67664 Україна, МПК (2012.01) F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом / Б.Є.Патон, Є.І.Крижанівський, М.М.Савицький, Е.А.Швидкий, В.В.Зайцев, О.М.Мандрик. – № u2011 14580; Заявл. 08.12.11; Опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.
4. Пат. 33882 Україна, МПК (2006) F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу / Є.І.Крижанівський, В.В.Зайцев, Г.Ф.Романовський, О.М.Карпаш, М.І.Гончарук, Д.В.Зайцев, Вал.В.Зайцев. - № u200804626; Заявл. 10.04.08; Опубл. 10.07.08 // Промислова власність. – 2008. – Бюл. № 13.
5. Р.Рид, Дж. Праусниц, Т.Шервуд. Свойства газов и жидкостей.– Л: Химия, 1982.– 592 с.
6. В.А.Загорученко, А.М.Журавлев. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метан.– М.: Издательство комитета стандартов мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1966.– 238 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
10.06.12*

*Рекомендована до друку оргкомітетом
міжнародної науково-технічної конференції
“Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу”,
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.*