

ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАПОВНЕННЯ СУДЕН CNG

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

Л. Є. Шкіца

Доктор технічних наук, професор
Кафедра інженерної та комп'ютерної графіки*

E-mail: lshkitsa@nung.edu.ua

*Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

Розглянуто проблемні питання, які вимагають особливої уваги при реалізації транспортної технології CNG. Наведено результати дослідження процесу заповнення газом ємностей, які засвідчують можливість використання імітаційного моделювання для оцінки впливу зміни температури газу на роботу обладнання для транспортування стисненого природного газу з метою підвищення його експлуатаційних характеристик та надійності

Ключові слова: транспортна технологія CNG, заповнення транспортного судна, імітаційне моделювання, температура газу

Рассмотрены проблемные вопросы, которые требуют особого внимания при реализации транспортной технологии CNG. Приведены результаты исследования процесса заполнения газом емкостей, удостоверяющие возможность использования имитационного моделирования для оценки влияния изменения температуры газа на работу оборудования для транспортировки сжатого природного газа с целью повышения его эксплуатационных характеристик и надежности

Ключевые слова: транспортная технология CNG, заполнение транспортного судна, имитационное моделирование, температура газа

1. Вступ

Реалізацію перспективних планів України щодо збільшення видобутку газу в акваторії Чорного та Азовського морів [1] можна прискорити за рахунок розроблення та впровадження транспортної технології CNG, яка дозволить ввести в комерційний обіг середні і малі родовища природного газу на континентальному шельфі. Ця ж технологія може стати ефективним вирішенням проблеми транспортування газу з родовищ, розташованих у глибоководних зонах, а також попутного газу нафтових родовищ, транспортування якого вважалося раніше нерентабельним. З метою конкретизації задач, що потребують розв'язання для наближення можливості реалізації технології, уточнено концептуальні засади побудови вантажної системи суден CNG [2]. Однак існують проблеми реалізації процесу заповнення вантажних систем суден, що обумовлює актуальність досліджень в цьому напрямку [3].

2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

Щодо використання транспортної технології CNG при експлуатації морських родовищ, то необхідно

виділити чинники, від яких залежатиме схема її реалізації. Насамперед необхідно звернути увагу на те, що такий чинник як хвилювання моря може внести значні корективи в графіку руху транспортних CNG суден. Через це реалізація транспортної технології CNG для експлуатації морських родовищ практично неможлива без газозовів виробничо-транспортного типу [4].

Наявність таких суден сприяє розв'язанню ряду проблемних питань вказаної технології. Насамперед забезпечує можливість безперервної експлуатації свердловин і якісну підготовку газу при різноманітних складах їх продукції та устьових тисках. Присутня у газозовах виробничо-транспортного типу вантажна система максимально узгоджує роботу компресорних установок із можливою продуктивністю підключених свердловин.

Однак особливої уваги при реалізації транспортної технології CNG для окремих проектів вимагає процес заповнення газом вантажних систем транспортних засобів.

Загалом при використанні суден або барж виробничо-транспортного і транспортного типу процес заповнення реалізується за трьома схемами (рис. 1).

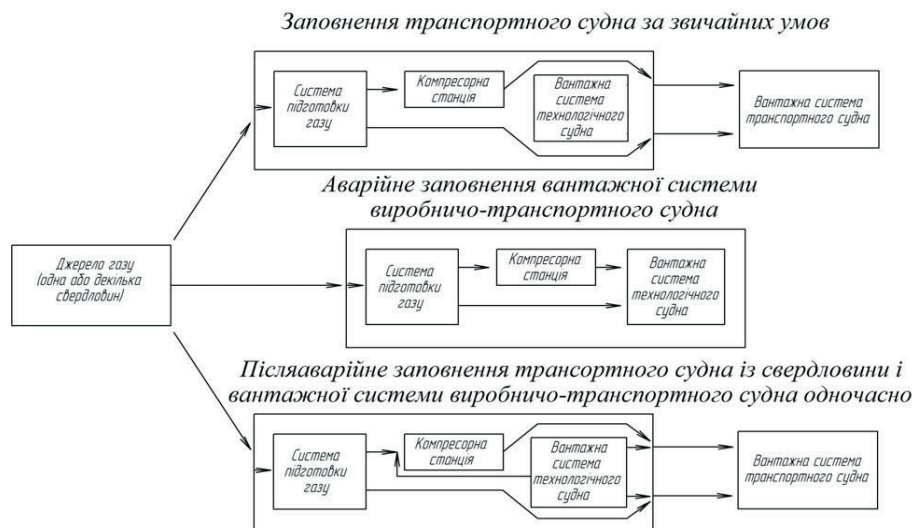


Рис. 1. Варіанти схем реалізації процесу заповнення транспортних суден

Перша схема відображає процес заповнення транспортного судна газом підготовленим на виробничо-транспортному судні за звичайних умов. Друга схема відповідає процесу аварійного заповнення вантажної системи виробничо-транспортного судна у випадку відсутності з'єднання з судном або баржою транспортного типу через несприятливі погодні умови або реалізацію з'єднувально-роз'єднувальних операцій. Третя схема відображає процес після аварійного заповнення транспортного судна підготовленим газом із свердловини і вантажної системи виробничо-транспортного судна одночасно.

Найскладнішим із варіантів є заповнення транспортного судна з джерела постачання та вантажної системи виробничо-транспортного судна одночасно. При цьому слід виділити наступні етапи процесу: заповнення транспортного судна за рахунок тиску газу джерела постачання; заповнення транспортного судна за рахунок тиску газу вантажної системи виробничо-транспортного судна; заповнення транспортного судна газом вантажної системи виробничо-транспортного судна з використанням компресорів; заповнення транспортного судна газом джерела постачання з використанням компресорів.

У кожному із випадків важливою проблемою, пов'язаною із функціонуванням вантажної системи, як суден виробничо-транспортного типу, так і безпосередньо транспортного, є проблема оптимізації режиму процесу заповнення. На певному етапі процес заповнення супроводжується різким розширенням і зміною температури газу, що може стати причиною аварій устаткування. Ця проблема стала предметом досліджень провідних фірм-розробників. Фірмою EperSea, наприклад, запатентована спеціальна технологія VOTRANS, що використовує принцип гідрозапора. Російські розробники заявляють про наявність ряду пропозицій щодо вирішення даної проблеми, які зараз патентуються [3, 4].

Одним із шляхів детального вивчення особливостей процесів заповнення є проведення комплексу експериментальних досліджень. Однак, зважаючи на складність проведення такого роду досліджень доціль-

ним є використання з цією метою імітаційного моделювання. Для підтвердження достовірності результатів такого моделювання необхідною умовою є проведення хоча б одиничного експерименту.

Таким чином, для оцінки можливого впливу зміни температури газу на роботу обладнання для транспортування стисненого природного газу потрібно провести теоретичні дослідження за умов дії ряду експлуатаційних чинників. Також необхідно здійснити експериментальну перевірку отриманих результатів у промислових умовах.

3. Обґрунтування доцільності використання імітаційного моделювання для дослідження процесів заповнення суден CNG

Для розглянутого нами варіанту заповнення транспортних суден одночасно із джерела постачання газу і вантажної системи виробничо-транспортного судна розширення газу і падіння його температури можливе для перших двох випадків. Другий випадок, а саме заповнення транспортного судна за рахунок тиску газу вантажної системи виробничо-транспортного судна, є точним відтворенням процесу перепуску газу із ємності в ємність, що реалізується на будь-якій автогазонаповнювальній компресорній станції (АГНКС) в ході заповнення балонів автотранспортних засобів.

Таким чином, детальне експериментальне вивчення особливостей цього процесу та порівняння отриманих результатів із результатами відповідного імітаційного моделювання у випадку їх співпадіння створить можливість дослідження процесів заповнення для різних варіантів конструкцій вантажних систем і режимів шляхом згаданого вже імітаційного моделювання.

Для імітаційного моделювання заповнення балонів автотранспортних засобів на АГНКС використане спеціалізоване програмне забезпечення. Відповідно до застосованої методики балони різних розмірів розглядаються як ділянки газопроводів з відповідними параметрами.

За умов стаціонарності процесів система рівнянь законів збереження маси, імпульсу та енергії у загальному випадку має вигляд [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial x}(P) = -\frac{\lambda \cdot v \cdot |v|}{2 \cdot d} \cdot \rho - g \cdot \rho \cdot \sin \alpha, \\ \frac{\partial}{\partial x}(h) = -\frac{4}{\rho \cdot v \cdot d} \cdot K_{cp} \cdot (T - T_0) - g \cdot \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

де ρ – густина природного газу, кг/м^3 ; v – швидкість газу у точці газопроводу, що розглядається, м/с ;

P – абсолютний тиск природного газу у заданій точці газопроводу, Па; λ – коефіцієнт гідравлічного опору ділянки газопроводу, безрозмірна величина; α – кут між твірною труби і горизонталлю, радіан; K_{cp} – середній на ділянці коефіцієнт загальної теплопередачі від газу до навколишнього середовища, Вт/м²·К; T – температура природного газу у заданій точці газопроводу, К; T_0 – температура газу на початку ділянки газопроводу, К; d – внутрішній діаметр труби, м; h – молярна ентальпія газу, Дж/моль.

Однак для вирішення поставлених задач слід враховувати наявність нестационарних процесів. За умов нестационарності процесів застосовувалося системи рівнянь нерозривності, руху та теплопровідності у такому вигляді [6, 7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial x} + F \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \\ \frac{1}{F} \cdot \frac{\partial G}{\partial t} - 2 \cdot v \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} + v^2 \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + g\rho \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda v |v|}{2d} \rho = 0, \\ F\rho C_p^{изот} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) - F \left(1 + \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right) \frac{\partial P}{\partial t} - Fv \frac{T}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \frac{\partial P}{\partial x} + Fvg\rho \frac{\partial H}{\partial x} + Q_e = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де G – масова витрата газу у точці газопроводу, що розглядається, кг/с; F – площа внутрішнього поперечного перерізу труби, м²; H – висота точки газопроводу, що розглядається, над рівнем моря, м; Z – коефіцієнт стисливості природного газу, безрозмірна величина; Q_e – потік тепла від газу через внутрішню поверхню в одиницю часу на одиницю довжини; $C_p^{изот}$ – питома ізобарна теплоємність газу, Дж/кг·К.

Для моделювання реальних властивостей природного газу використовувалося рівняння Соаве–Редліха–Квонга [8, 9].

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)}, \quad (3)$$

де P – абсолютний тиск, Па; T – абсолютна температура, К; V – молярний об'єм, м³/моль; R – універсальна газова стала; $R = 8,31441$ Дж/моль·К; a, b – коефіцієнти рівняння стану, що залежать від властивостей речовини.

Коефіцієнти рівняння стану a та b для окремого компонента газу залежать від критичного тиску, температури компонента та фактора ацентричності молекули речовини за такими залежностями:

$$a(T) = a_{кр} \cdot \alpha(T), \quad (4)$$

$$a_{кр} = \Omega_a \cdot \frac{R^2 \cdot T_{кр}^{2.5}}{P_{кр}}, \quad (5)$$

$$b = \Omega_b \cdot \frac{R \cdot T_{кр}}{P_{кр}}, \quad (6)$$

$$\alpha(T) = \left(1 + m \left(1 - \left(\frac{T}{T_{кр}} \right)^{0.5} \right) \right)^2, \quad (5)$$

$$m = 0,480 + 1,574 \cdot \omega - 0,176 \cdot \omega^2, \quad (7)$$

де Ω_a та Ω_b – коефіцієнти, що становлять 0,42748 та 0,08664 відповідно [8]; $T_{кр}$ – критична температура компонента газу, К; $P_{кр}$ – критичний тиск компонента газу, Па; ω – фактор ацентричності речовини.

Технологічний процес заповнення автомобільних балонів на АГНКС для точного відтворення його особливостей необхідно розділити на два етапи. Перший етап полягає у заповненні акумуляторів газу геометричним об'ємом 9 м³ кожен до абсолютного тиску у 21-22 МПа із визначенням параметрів газу в акумуляторах. Другим етапом є заповнення автомобільного балону із певним початковим тиском шляхом перепуску газу з акумуляторів. Метою імітаційного моделювання є визначення тривалості заповнення, температури і тиску в процесі перепускання та динаміки їх зміни. Розрахункова схема процесу заповнення наведена на рис. 2. Граничні умови розрахунку при цьому наступні:

- максимальний тиск у акумуляторі 21 МПа;
- максимальний тиск в балоні 20,5 МПа;
- температура навколишнього середовища 10 °С;
- геометричний об'єм балона 90 л (довжина 1 м, внутрішній діаметр 340 мм).

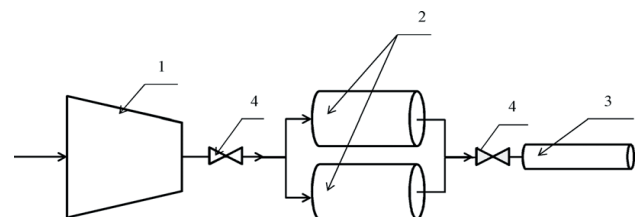


Рис. 2. Розрахункова схема процесу заповнення балона на АГНКС: 1 – поршневий компресор; 2 – акумулятори газу; 3 – автомобільний балон; 4 – запірні пристрої

На рис. 3 – 5 наведені результати моделювання процесу заповнення балона для вказаних вище умов.

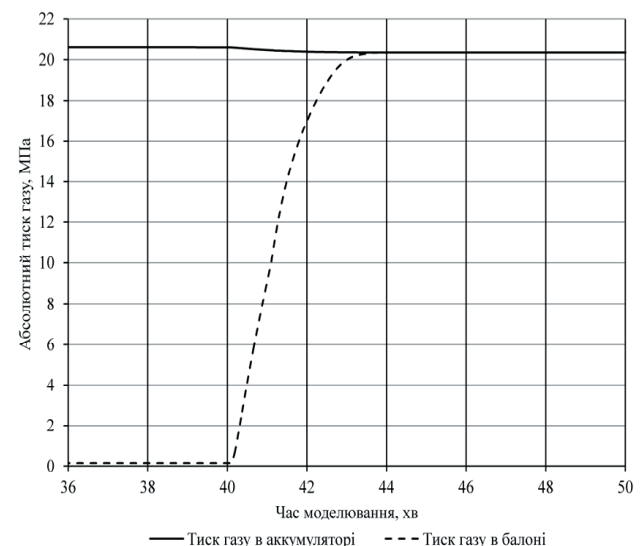


Рис. 3. Зміна тиску в акумуляторі і балоні в процесі його заповнення

Як бачимо з рис. 3, процес заповнення відбувається протягом близько 4-х хвилин про що свідчить вирівнювання тиску в акумуляторі і балоні. На рис. 4 наведені результати дослідження зміни температури газу в процесі заповнення в ділянці горловини та посередині балона. Початковий момент заповнення балона характеризується різким зниженням температури газу на вході та її підвищенням вже посередині балона. Це пояснюється відповідно проявом ефекту Джоуля-Томсона [10] та ефекту розігріву балона [11]. Для визначення їх впливу на температуру стінки балона проведені дослідження результати яких наведені на рис. 5.

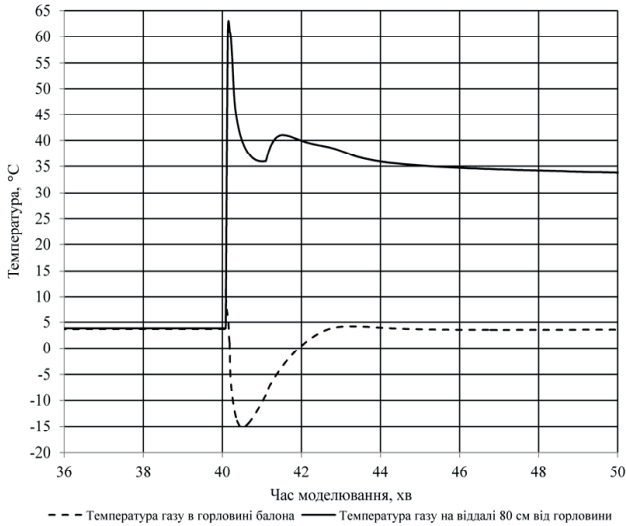


Рис. 4. Зміна температури газу в процесі заповнення балона

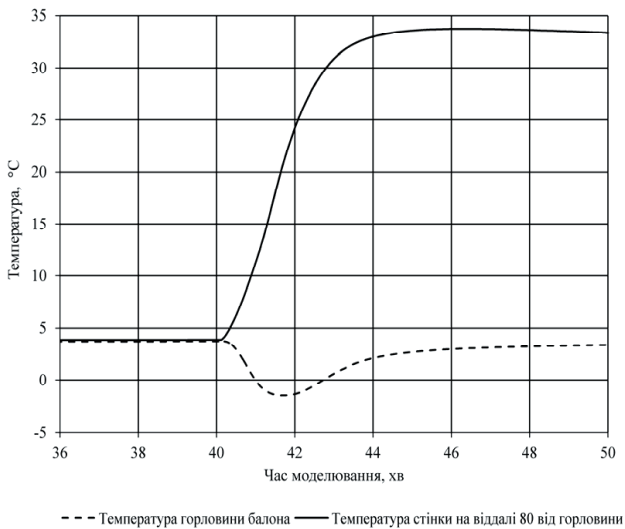


Рис. 5. Зміна температури стінки балона в процесі його заповнення

За результатами моделювання можна зробити висновки про те, що вплив ефекту Джоуля-Томсона відчутний лише у першій третині балона та із збільшення віддалі від точки під'єднання цей ефект повністю компенсується нагрівом природного газу за рахунок ефекту розігріву балонів. За вказаних умов моделювання можна відмітити, що під час заповнення природним

газом автомобільного балона об'ємом 90 л із початкового тиску 0,15 МПа до кінцевого тиску у 20,5 МПа температура зовнішньої стінки досягає 33 °С.

Для підтвердження результатів імітаційного моделювання проведено експериментальне дослідження процесу заповнення балона. Контролю підлягав такий параметр, як температура стінки балона (рис. 6, а – в). Як видно з рис. 5, 6 результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень добре корелюються.

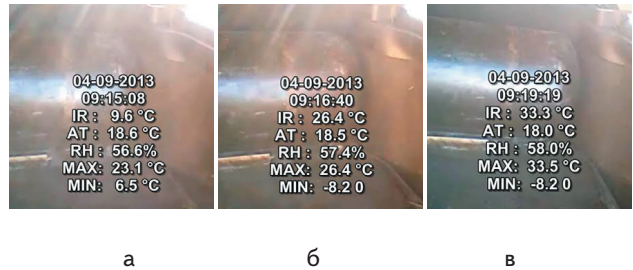


Рис. 6. Результати експериментальних досліджень зміни температури стінки балона на відстані 80 см від входу в процесі його заповнення: а – в початковий момент; б – на другій хвилині; в – на четвертій хвилині

Для підтвердження правдивості результатів імітаційного моделювання і за інших початкових умов проведено дослідження процесу заповнення двох автомобільних балонів при температурі навколишнього середовища -4 °С. Розрахункова схема процесу заповнення двох автомобільних балонів наведена на рис. 7, а результати імітаційного моделювання на рис. 8 – 10.

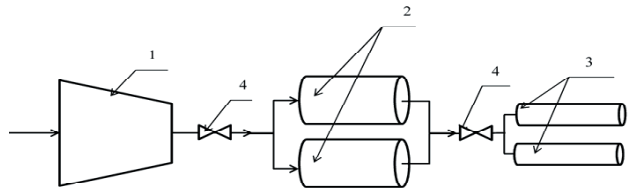


Рис. 7. Розрахункова схема процесу заповнення балонів на АГНКС: 1 – поршневий компресор; 2 – акумулятори газу; 3 – автомобільні балони; 4 – запірні пристрої

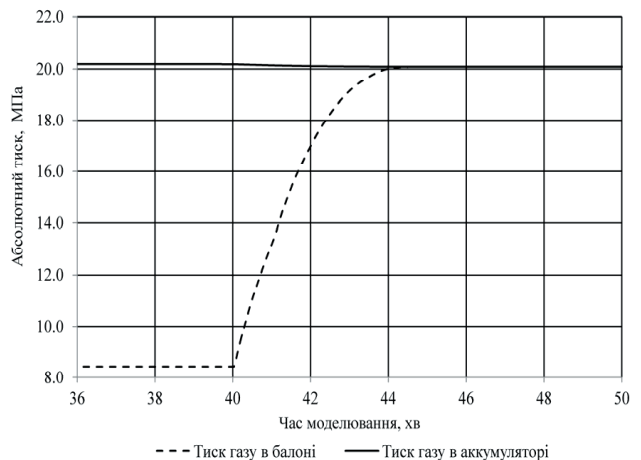


Рис. 8. Зміна тиску в акумуляторі і балонах в процесі їх заповнення

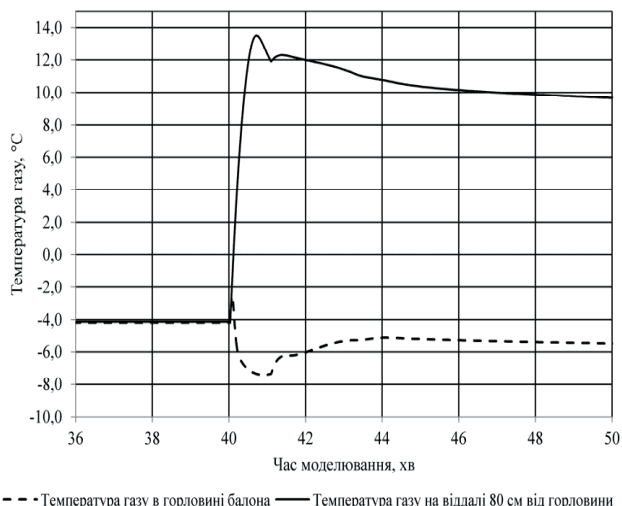


Рис. 9. Зміна температури газу в процесі заповнення

Слід зауважити, що для другого дослідю, окрім відмінності температури навколишнього середовища та кількості балонів, значно більшим був початковий тиск в балонах, який становив 8,45 МПа. Саме цим і пояснюється наявність меншого розмаху температури газу в балоні (рис. 9) і, як наслідок, зменшення рівня розігріву його стінки (рис. 10).

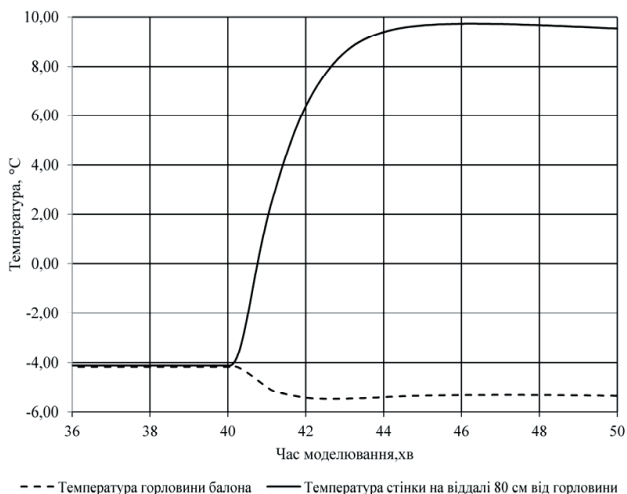
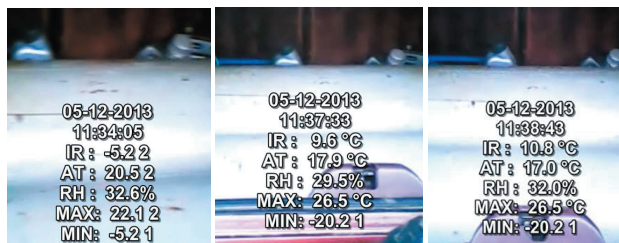


Рис. 10. Зміна температури стінки балона в процесі його заповнення

Як і в першому дослідю результати імітаційного моделювання засвідчують зменшення температури газу внаслідок різкого його розширення. Зменшен-

ня температури присутнє в початковий нетривалий момент часу і підтверджується обледенінням запірної арматури. Загальний вплив зменшення температури газу є таким, що не призводить до суттєвого зменшення температури стінки балона (рис. 11, а). Однак, при подальшому наповненні до максимального тиску 20 МПа температура стінок підвищується (рис. 11, б, в).



а б в

Рис. 11. Результати експериментальних досліджень зміни температури стінки посередині балона в процесі його заповнення: а – в початковий момент; б – на третій хвилині; в – на четвертій хвилині

Загалом рівень підвищення температури залежить від початкового тиску і становити близько 30 °С при початковому тиску 0,15 МПа та 14 °С при тиску 8,45 МПа.

4. Висновки

За результатами теоретичних досліджень процесу заповнення ємностей встановлено, що зменшення температури газу внаслідок різкого його розширення присутнє в початковий нетривалий момент часу і підтверджується обледенінням запірної арматури в ході експериментальних досліджень.

Загальний вплив зменшення температури газу є таким, що не призводить до зменшення температури стінки. При подальшому заповненні ємностей температура газу і, відповідно, їх стінок зростає. Рівень зростання визначається, в основному, значенням початкового тиску в ємності.

Результати імітаційного моделювання за різних початкових умов з високою точністю підтверджені результатами експерименту.

Таким чином, отримані результати засвідчили можливість використання імітаційного моделювання для оцінки впливу зміни температури газу на роботу обладнання при транспортуванні стисненого природного газу.

Література

1. Проект оновленої «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://tre.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/publish/article?art_id=222035.
2. 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 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2013. – № 2 (35) – С. 7–15.
3. CNG Offshore [Electronic resource] / Available at: <http://cng.intari.com/>.

4. Перспективные суда и технические средства для нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.vympel.ru/ru/publikaczii/10-publikaczii/110-perspektivnye-suda-i-texnicheskie-sredstva-dlya-neftegazovoj-otrasli>.
5. White, Frank M. Fluid mechanics [Text] / Frank M. White; 7th ed / M. White Frank. – Published by McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies. – New York, NY 10020. Copyright © by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved, 2011. – 863 p.
6. Katz, D. L. Handbook of natural gas engineering [Text] / D. L. Katz, D. Cornell, R. Kobayashi and others. – McGraw-Hill Book Company, inc. New York, Toronto, London, 1959. – 712 p.
7. Bendlken, K. H. The Dynamic Two-Fluid Model OLGA: Theory and Application [Text] / K. H. Bendlken, D. Maine, R. Moe, S. Nuland. – Inst. for Energy Technology. SPE 19451 SPE Production Engineering, 1991. – P. 171–180.
8. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л: Химия, 1982. – 592 с.
9. Загорученко, В. А. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метан [Текст] / В. А. Загорученко, А. М. Журавлев. – М.: Издательство комитета стандартов мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1969. – 238 с.
10. Joule–Thomson effect [Electronic resource] / Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Joule%E2%80%93Thomson_effect.
11. Гайнуллин, Ф. Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте [Текст] / Ф. Г. Гайнуллин, А. М. Гриценко, Ю. Н. Васильев, Л. С. Золотаревский. – М.: Недра, 1986. – 255 с.

В статті описана методика багатокритеріальної оптимізації структури та параметрів технологічних операцій і переходів залежно від особливостей функціонування виробу у складі машини чи технологічної системи та забезпечення виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу його роботи. Наведено методіку та алгоритм формування адитивного критерію оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, функціонально-орієнтована технологія, критерій оптимізації, життєвий цикл виробу

В статье описана методика многокритериальной оптимизации структуры и параметров технологических операций и переходов в зависимости от особенностей функционирования изделия в составе машины или технологической системы и обеспечения выполнения заданного, необходимого или предельного эксплуатационного потенциала его работы. Приведена методика и алгоритм формирования аддитивного критерия оптимизации функционально-ориентированного технологического процесса

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, функционально-ориентированная технология, критерии оптимизации, жизненный цикл изделия

УДК 621.9(075.8)

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

В. В. Ступницький

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра технології машинобудування
Національний університет «Львівська політехніка»,
Інститут інженерної механіки і транспорту
вул. Професорська, 2, м. Львів, Україна, 79013
E-mail: stupn@i.ua

1. Вступ

Об'єктивні умови розвитку ринкової економіки в сучасних умовах глобалізованого суспільства визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва продукції машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом всього

життєвого циклу продукції. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами, ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової (як результат розширення та вдосконалення експлуатаційних та сервісних властивостей виробів) підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів