

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ТРАНСПОРТУВАННЯ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ (CNG)

В. І. Артим, А. П. Джус, В. В. Михайлюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,
e-mail: andriy_dzhus@i.ua

Наведено результати досліджень напружено-деформованого стану спеціальних ємностей, виконаних у вигляді рухомого трубопроводу, за умов зміни тиску газу та його температури в процесі заповнення суден CNG. Встановлено рівень впливу окремих складових навантаження на формування напружено-деформованого стану. За результатами досліджень напружено-деформованого стану з'єднання лінійних ділянок встановлено наявність циклу напружень низького рівня, зумовлених температурними процесами при заповненні рухомого трубопроводу. Визначено напрямки подальших досліджень, за основу яких взято дослідження напружено-деформованого стану елементів рухомого трубопроводу в процесі його розвантаження.

Ключові слова: транспортна технологія CNG, рухомий трубопровід, імітаційне моделювання, температура газу, тиск газу, напружено-деформований стан.

Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния специальных емкостей, выполненных в виде подвижного трубопровода, в условиях изменения давления газа и его температуры в процессе заполнения судов CNG. Установлен уровень влияния отдельных составляющих нагрузки на формирование напряженно-деформированного состояния зоны соединения линейных участков установлено наличие цикла напряжений низкого уровня, обусловленных температурными процессами при заполнении подвижного трубопровода. Определены направления дальнейших исследований, которые заключаются в исследовании напряженно-деформированного состояния элементов подвижного трубопровода в процессе его разгрузки.

Ключевые слова: транспортная технология CNG, подвижной трубопровод, имитационное моделирование, температура газа, давление газа, напряженно-деформированное состояние.

The article presents the results of the studies of stressed-deformed state of special tanks made in the form of a flexible pipeline under the conditions of change of the gas pressure and temperature during the process of filling vessels with the CNG. The level of influence of the individual load components onto the stressed-deformed state formation was determined. Presence of the low level stress cycle, caused by the thermal processes when filling the flexible pipeline, was found out on the basis of the study results of the stressed-deformed state of the linear sections connection zone. The further study directions, based on the studies of the stressed-deformed state of the flexible pipeline components during the process of discharge, were determined.

Key words: CNG transportation technology, flexible pipeline, simulation modeling, gas temperature, gas pressure, stressed-deformed state.

Вступ

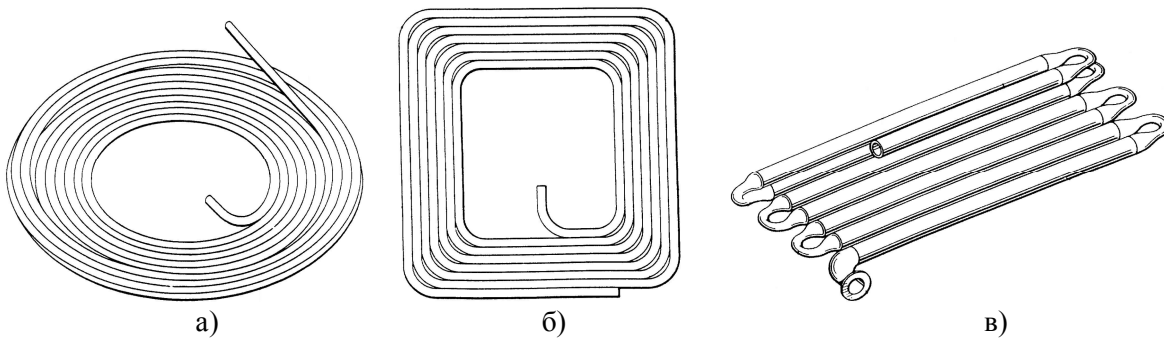
На сьогодні CNG-технології відносяться до найбільш науковооб'ємних, а їх реалізація вимагає розв'язання цілого комплексу проблем. Насамперед виникає питання щодо забезпечення надійної експлуатації спеціальних ємностей для транспортування газу за умов циклічного навантажування внутрішнім тиском до 25 МПа і різких перепадів температури [1, 2].

Аналіз стану досліджень та публікацій

Одним із основних завдань для реалізації транспортної технології CNG завжди вважалось розроблення оптимальної конструкції спеціальних ємностей. Так, компанія Neptune Gas Technologies (NGT), яка успадкувала всі напрацювання і активи в галузі технології CNG від компанії TransCanada, для зберігання і транспортування CNG пропонує сталеві посудини високого тиску із зовнішнім композитним підсиленням (CRPVs). Такі ємності вже з 2007 ро-

ку широко використовуються для транспортування CNG на вантажному транспорті. Однак, недоліком використання CRPVs на морському транспорті є складність взаємозв'язку між трубопроводами і системою клапанів в судовій системі транспортування газу, яка містить велику кількість окремих циліндрів. Тому виникла необхідність у створенні такої системи зберігання стиснутого газу, в якій можна було б помістити більшу його кількість, спростивши при цьому складну систему трубопроводів і клапанів.

Застосування довгих відрізків безперервної труби для зберігання газу сприяє спрощенню конструкції загалом та значному зниженню вартості системи. Безперервна труба може бути змонтована всередині контейнера різним чином: у вигляді спіралі, з вигинами мінімального радіуса для заповнення контейнера прямокутної форми, з U-подібними петлями, прилеглими один до одного (рис. 1) [3]. В окремих випадках ємності такої конструкції називають рухомим трубопроводом [4].



а) у вигляді спіралі; б) з вигинами мінімального радіуса для заповнення контейнера прямокутної форми; в) з U-подібними петлями, прилеглими один до одного

Рисунок 1 – Варіанти укладання безперервних труб у контейнерах для транспортування газу

Рухомий трубопровід – довгомірний виріб, що конструктивно складений із стандартних газопровідних труб, з'єднаних електрозварюванням з допомогою стандартних відводів і розміщений у спеціальному модулі або безпосередньо на морському транспортному засобі.

Відомий цілий ряд праць [5-7], що присвячені розробленню технології транспортування стиснутого газу через морські акваторії. Однак, питання поведінки елементів спеціальних ємностей в процесі заповнення є недостатньо дослідженим.

Аналізуючи попередньо отримані результати досліджень процесів заповнення спеціальних ємностей, виконаних у вигляді рухомого трубопроводу, що містить паралельно розміщені лінійні ділянки, слід зазначити, що характер зміни температури газу на різних лінійних ділянках є різним. Різниця температури газу на окремих ділянках трубопроводу призводить до різних температурних видовжень. Особливої уваги ця особливість набуває з огляду на паралельне розміщення ділянок ємності для транспортування газу, так як в кінцевому результаті зумовлюватиме зміну напружено-деформованого стану її елементів. Визначення діапазону зміни напружень створить можливість оцінки впливу експлуатаційних умов на забезпечення надійності рухомих трубопроводів.

Постановка завдання

Таким чином, основним завданням при проектуванні спеціальних ємностей, виконаних у вигляді рухомого трубопроводу, є забезпечення їх надійної і безпечної експлуатації за умов циклічного навантаження. З цією метою необхідними є дослідження напружено-деформованого стану їх елементів під сумісним впливом змінних в процесі завантаження тиску і температури.

Опис вирішення задачі

Багато завдань, які постають перед дослідниками та інженерами, не піддаються аналітичному вирішенню або потребують значних витрат на експерименти. Найчастіше єдиною можливістю прискореного аналізу інженерної

проблеми є імітаційне моделювання. Прогрес у розробці числових методів дає можливість істотно розширити спектр завдань, які доступні аналізу. Отримані на основі цих методів результати використовуються практично у всіх галузях науки й техніки.

В аналізі конструкцій знаходить найбільше застосування метод кінцевих елементів. Існує багато різних комп'ютерних програм, що реалізують цей метод. Однак найпоширенішою є програма ANSYS – потужна комп'ютерна система для проектування й виконання аналізу [8]. Вона використовується на етапі проектування, щоб визначити, як конструкція буде поводитись під час експлуатації. Також програму ANSYS можна використовувати для оптимізації геометрії деталей. Програма ANSYS працює в середовищі найбільш використовуваних операційних систем і на всіх розповсюджених комп'ютерних платформах.

З метою дослідження напружено-деформованого стану елементів рухомого трубопроводу попередньо розроблено конструкцію, придатну до монтажу на найпростішому морському транспортному засобі – баржі [9]. З врахуванням геометричних параметрів вибраної баржі лінійні ділянки виконано 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 рухомого трубопроводу зображено на рисунку 2. При цьому, кріплення лінійних ділянок з міркувань зменшення впливу на формування напружено-деформованого стану конструкції рухомого трубопроводу здійснюється з використанням рухомих і нерухомих опор.

Для створення можливості детального дослідження напружено-деформованого стану елементів рухомого трубопроводу, що містить паралельно розміщені лінійні ділянки, виділено найбільш характерну зону. Зважаючи на особливості кріплення та зміни температури стінки рухомого трубопроводу по його довжині, ця зона складається із частин першої та другої лінійних ділянок і безпосередньо їх з'єднання. На рисунку 3 наведено її тривимірну модель, побудовану у програмному середовищі Ansys Workbench. При побудові тривимірної моделі

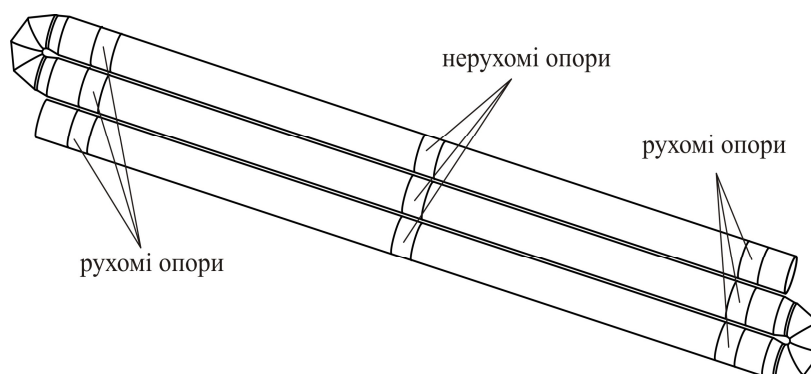


Рисунок 2 – Загальний вигляд частини рухомого трубопроводу з вказаним розміщенням опор для кріплення трубопроводу

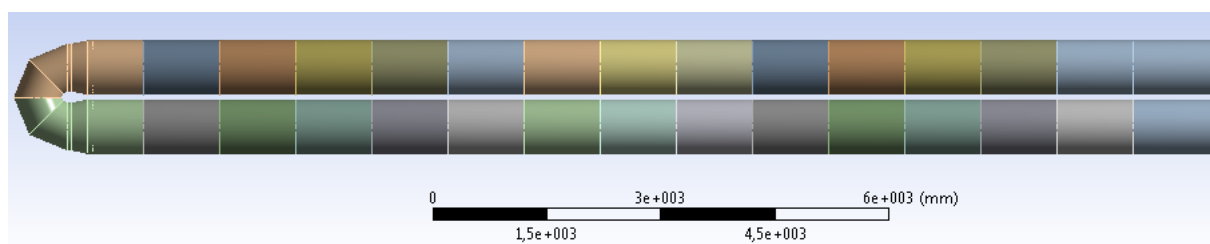
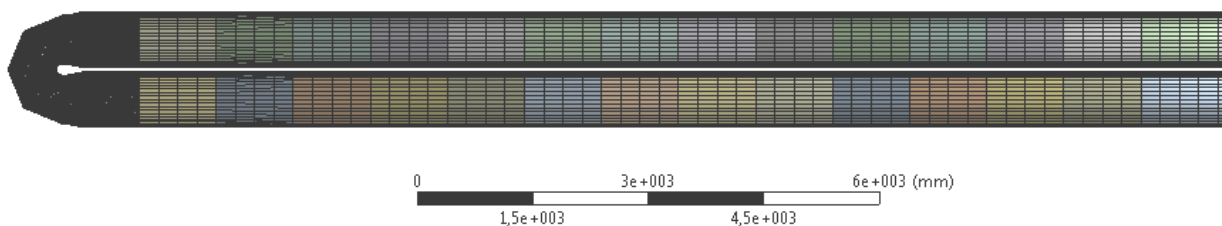
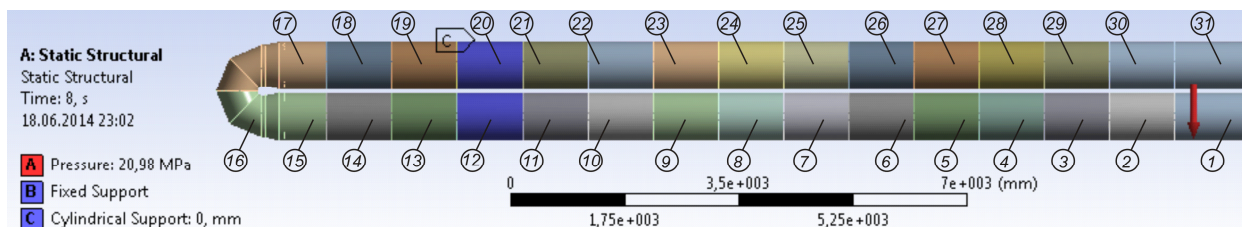


Рисунок 3 – Тривимірний модель досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу



а)



б)

Рисунок 4 – Сітка кінцевих елементів (а) та розрахункова схема (б) моделі досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу

застосовано функцію **Slice**, за допомогою якої виконано розділення циліндричної частини на елементи довжиною 1 м. Виконання циліндричних частин у вигляді складеної конструкції зумовлене необхідністю врахування зміни температури по їх довжині.

Під час побудови сітки кінцевих елементів використано **Sweep Method**, що дає змогу створити гексаедральну сітку циліндричної частини. Для частини, що забезпечує з'єднання лінійних ділянок, сітку створено з допомогою функції **Body Sizing** з елементами заданого розміру, а саме 30 мм (рис. 4 а).

Під час складання розрахункової схеми (рис. 4 б) використано функції програми **Fixed**

Support та **Cylindrical Support** для закріплення елементів довгомірного трубопроводу і функції **Pressure** та **Thermal Condition** з метою задання дії внутрішнього тиску та температури. Матеріалом елементів досліджуваного об'єкту є сталь з такими властивостями: $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu=0,28$.

Оскільки температура і тиск газу в процесі заповнення є змінними в часі параметрами, то з метою отримання повної картини зміни напружено-деформованого стану елементів рухомого трубопроводу в процесі його заповнення на основі попередніх результатів досліджень виділено ряд вхідних даних. Такими даними є температура та тиск газу, визначені для характерної зони на кожному метрі лінійної ділянки трубо-

Таблиця 1 – Значення температури (°C) по довжині досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу

Точки прикладання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Час заповнення, хв	0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	
	60	39,8	39,6	39,5	39,4	39,3	39,2	39,1	38,9	38,8	38,7	38,5	38,4	38,2	38,1	37,9	37,8
	120	44,2	44,3	44,3	44,4	44,5	44,6	44,6	44,7	44,8	44,8	44,9	45,0	45,0	45,1	45,1	45,2
	180	45,2	45,4	45,5	45,6	45,7	45,9	46,0	46,1	46,3	46,4	46,5	46,6	46,8	46,9	47,0	47,1
	240	45,8	46,0	46,1	46,3	46,5	46,6	46,7	46,9	47,1	47,2	47,4	47,5	47,6	47,8	48,0	48,1
	300	46,4	46,6	46,7	46,9	47,1	47,2	47,4	47,6	47,8	47,9	48,1	48,3	48,4	48,6	48,8	48,9
	360	46,8	47,0	47,2	47,3	47,5	47,7	47,9	48,1	48,2	48,4	48,6	48,8	48,9	49,2	49,3	49,5
	375	46,3	46,5	46,7	46,9	47,1	47,2	47,4	47,6	47,8	47,9	48,1	48,3	48,5	48,7	48,8	49,0
Точки прикладання	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Час заповнення, хв	0	10,4	10,4	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,4	10,4	10,4	
	60	37,1	37,0	36,9	36,7	36,5	36,4	36,2	36,1	35,9	35,7	35,6	35,4	35,2	35,1	34,9	
	120	45,2	45,2	45,2	45,3	45,3	45,3	45,4	45,4	45,4	45,4	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	
	180	47,4	47,5	47,6	47,7	47,8	47,9	48,1	48,2	48,3	48,4	48,5	48,6	48,8	48,9	49,0	
	240	48,4	48,5	48,7	48,9	49,0	49,1	49,3	49,4	49,6	49,7	49,9	50,0	50,2	50,3	50,4	
	300	49,3	49,4	49,6	49,8	49,9	50,1	50,3	50,4	50,6	50,8	50,9	51,1	51,3	51,4	51,6	
	360	49,9	50,0	50,2	50,4	50,6	50,7	51,0	51,1	51,3	51,5	51,7	51,8	52,0	52,2	52,4	
	375	49,4	49,5	49,7	49,9	50,1	50,2	50,4	50,6	50,7	51,0	51,1	51,3	51,5	51,6	51,8	

Таблиця 2 – Зміна тиску в процесі заповнення рухомого трубопроводу

Час заповнення, хв	0	60	120	180	240	300	360	375
Тиск, МПа	0,45	3,70	6,89	10,19	13,75	17,69	21,00	20,98

проводу в початковий момент та з інтервалом 60 хв. до закінчення процесу заповнення (6 год.). Значення цих параметрів подано у таблицях 1 та 2, а схему прикладання тиску і температури на кожен метр трубопроводу наведено на рисунку 4 б. Слід зауважити, що в певний момент часу тиск газу на досліджуваній ділянці є практично однаковим у всіх точках прикладання тиску. Тому таблиця 2 має спрощений вигляд.

Результатами проведеного дослідження є отримані епюри розподілу деформацій та напружень у конструкції довгомірного трубопроводу. На рисунку 5 вказано точки контролю та значення осьових деформацій (по осі X) для дослідження трубопроводу на 5-ій годині його заповнення.

На рисунку 6,а наведено картину розподілу деформацій, визначених в момент досягнення максимального значення тиску, а на рисунку 6,б – розподіл еквівалентних напружень за Мізесом.

Аналізуючи результати проведених досліджень, необхідно відмітити наявність напружень підвищеного рівня на лінійних ділянках та по внутрішньому радіусі зони їх з'єднання. Зниження рівня напружень на лінійних ділянках є можливим завдяки використанню двошарової комбінованої конструкції [2, 10]. Внутрішній шар її складають стандартні сталеві пря-

мошовні труби, зовнішній шар – композиційний матеріал, виконаний кільцевим намотуванням волокнистого матеріалу перпендикулярно до повздовжнього шва. Така конструкція є рівномірною, тобто в ній одночасно вичерпуються параметри міцності металу та композиційного матеріалу, і сприяє зменшенню маси спеціальних емностей.

В той же час зона з'єднання лінійних ділянок, а саме її напружено-деформований стан, потребує детального подальшого вивчення. З цією метою на рисунку 7 відображено результати досліджень для поверхонь зони з'єднання, що відповідають умовно його внутрішньому та зовнішньому радіусу.

З рисунка 7 видно, що еквівалентні напруження в зоні з'єднання максимально заповненого рухомого трубопроводу по внутрішньому радіусу з'єднання є значно більшими, ніж по зовнішньому. Зважаючи на це та з врахуванням нестаціонарності температурних процесів, нами досліджено зміну еквівалентних напружень в процесі заповнення трубопроводу (рис. 8). Як видно з рисунка, графіки розподілу еквівалентних напружень на різних етапах заповнення є практично симетричними. Виключенням є графік, що відповідає першій годині заповнення.

Зважаючи на рівномірність розподілу тиску газу по довжині досліджуваної ділянки, попередній аналіз отриманих результатів під-

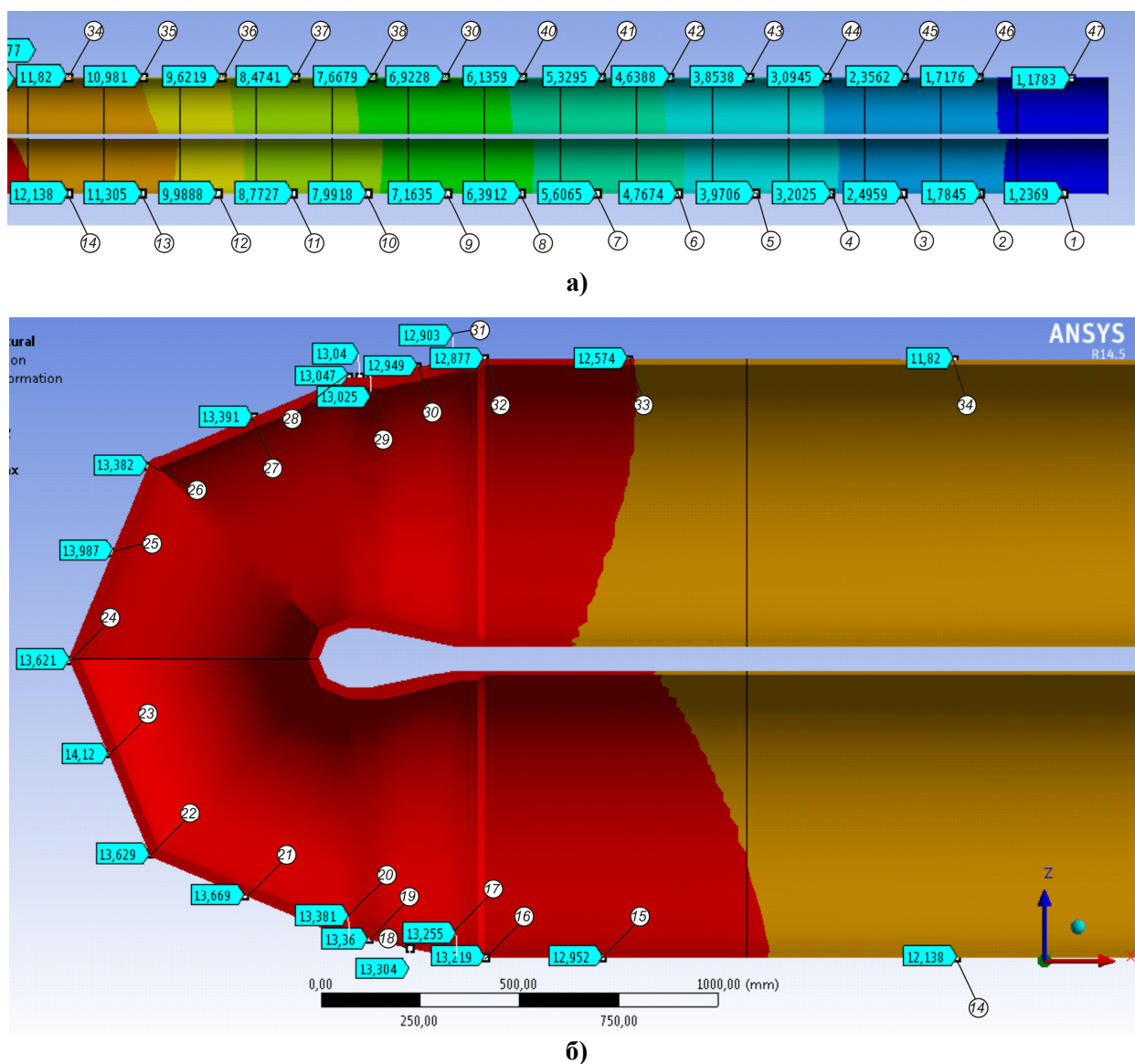


Рисунок 5 – Точки контролю деформацій у циліндричній (а) та перехідній (б) частинах моделі досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу

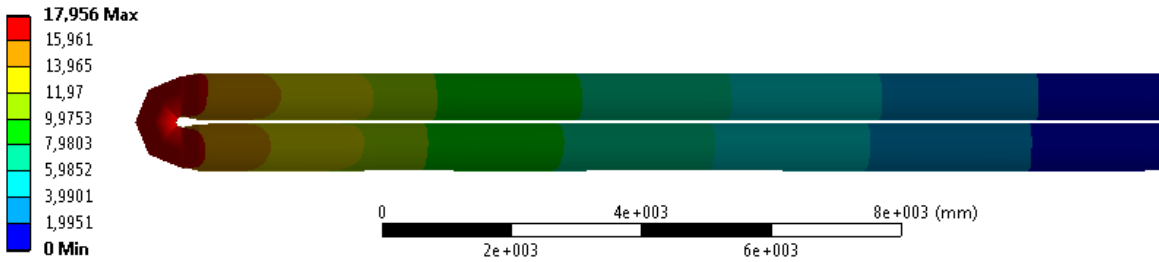
тверджує наявність впливу температурних процесів на напружено-деформований стан зони в початковий момент заповнення трубопроводу. Для детальної оцінки рівня їх впливу необхідними є дослідження зміни осевих напружень (по осі X) на вказаному етапі заповнення. Отримані результати наведено на рисунку 9. Як видно із порівняння отриманих результатів в початковий момент (рис. 9 а), після першої (рис. 9 б) та другої (рис. 9 в) години заповнення розподіл осевих напружень зазнає суттєвої зміни. В початковий момент заповнення рівень напружень є незначним, а картина розподілу є певною мірою симетричною відносно середини досліджуваної ділянки і містить явно виражені дві зони максимуму. Після першої години заповнення картина розподілу характеризується тільки однією явно вираженою зоною максимуму. Надалі (після другої години заповнення) картина розподілу повертається практично до початкової форми, але абсолютні максимуми

міняються місцями відносно середини досліджуваної ділянки. При цьому на першій годині заповнення значення максимуму зростає значно швидше, ніж на другій.

Оскільки наведені на рисунку 9 результати отримано для зовнішньої поверхні стінки зони з'єднання лінійних ділянок по внутрішньому її радіусу, то для відтворення повної картини напружено-деформованого стану на рисунку 10 наведено аналогічні результати для внутрішньої поверхні стінки.

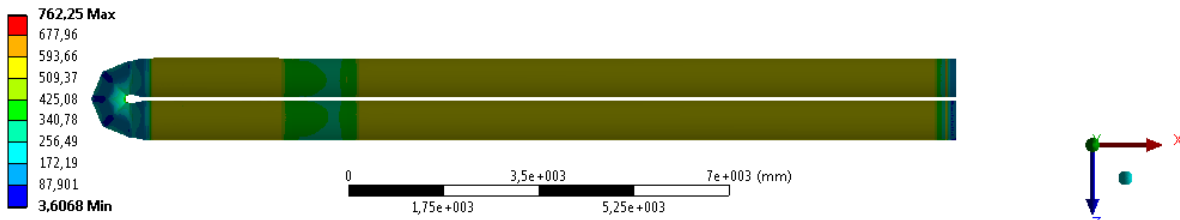
Проаналізувавши наведені вище результати, необхідно зауважити, що картина розподілу осевих напружень по внутрішній поверхні стінки характеризується абсолютною симетричністю відносно середини досліджуваної ділянки в початковий момент та після другої години заповнення рухомого трубопроводу. Щодо картини розподілу напружень після першої години заповнення, то вона містить мінімум в зоні, якій відповідає максимум на зовнішній поверхні

A: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 8
 18.09.2014 11:32



а)

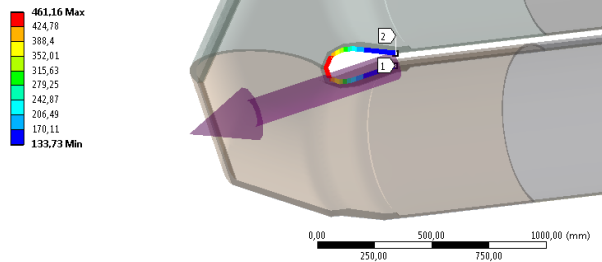
A: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 8
 18.09.2014 11:40



б)

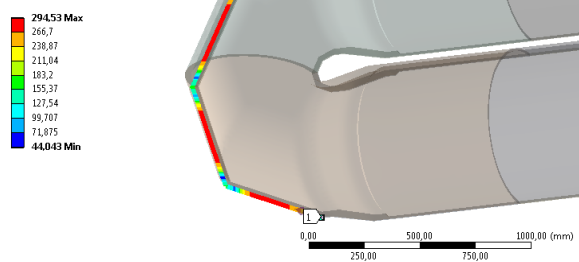
Рисунок 6 – Розподіл сумарних деформацій (а) та напружень за Мізесом (б) у досліджуваній моделі ділянки рухомого трубопроводу

A: Static Structural
 Equivalent Stress 2
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 8
 18.09.2014 11:45



а)

A: Static Structural
 Equivalent Stress 3
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 8
 18.09.2014 11:46



б)

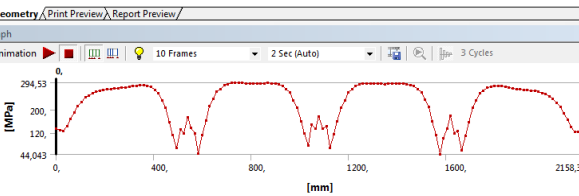
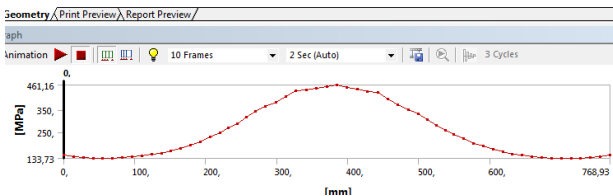


Рисунок 7 – Розподіл еквівалентних напружень у зоні з'єднання досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу по його внутрішньому (а) та зовнішньому (б) радіусах

стілки. Підсумовуючи отримані результати, можна стверджувати, що на початковому етапі заповнення рухомого трубопроводу зміна температури газу, яка при цьому характеризується найбільш вираженою нерівномірністю по його довжині, зумовлює наявність місцевих корот-

кочасних навантажень низького рівня в зоні з'єднання лінійних ділянок. Це в свою чергу засвідчує необхідність оцінки міцності досліджуваних ділянок рухомого трубопроводу з врахуванням двочастотності процесу навантаження [11].

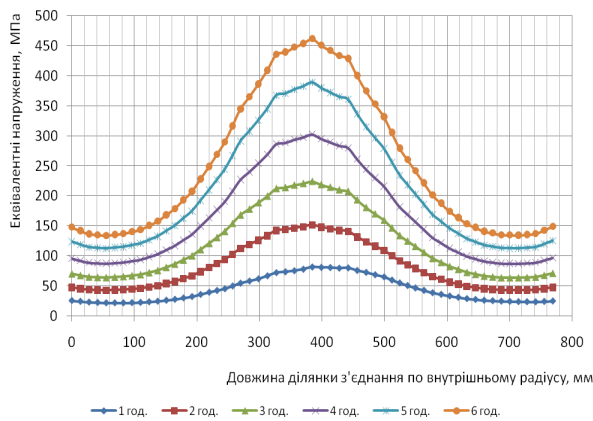


Рисунок 8 – Розподіл еквівалентних напружень по внутрішньому радіусу зони з'єднання досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу в процесі його заповнення

Висновки

Таким чином, за результатами проведених досліджень напружено-деформованого стану зони з'єднання лінійних ділянок рухомого трубопроводу встановлено наявність циклу напружень низького рівня, зумовлених температурними процесами при його заповненні. Зважаючи на це, оцінку довговічності елементів рухомого трубопроводу потрібно здійснювати з врахуванням двочастотності процесу навантажування. При цьому також необхідним є комплексне урахування параметрів навантажування і характеристик опору втомі елементів конструкцій, які підлягають впливу двочастотного навантажування. Для комплексної оцінки навантажень, що діють на елементи рухомого трубопроводу за повний цикл його роботи необхідні подальші дослідження зміни їх температури та, відповідно, напружено-деформованого стану в процесі розвантаження.

Література

1 Джус А. П. Використання імітаційного моделювання для дослідження процесів заповнення суден CNG [Текст] / А. П. Джус, О. М. Сулак, Л. Є. Шкіца // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2014 – Том 2, № 3(68). – С. 4-9.
 2 Джус А. П. Особливості проектування елементів рухомих трубопроводів [Текст]: зб. наук. пр. 5-ї Міжнар. конф. / А. П. Джус, Р. С. Грабовський, Вал. В. Зайцев // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. – ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2014. – С. 783-790.
 3 Пат. 2155696 Рос. Федерация:, МПК В63В25/14. Судовая система транспортировки газа / Стеннинг Дейвид Дж., Крэн Джеймс А. (СА); заявитель и патентообладатель ЭНРОН ЭЛ-ЭН-ДЖИ ДИВЕЛОПМЕНТ КОРП. (US). – № 99101831/28; заявл. 26.09.97; опубл. 10.09.00, Бюл. № 27.

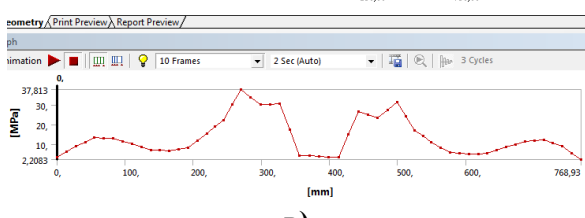
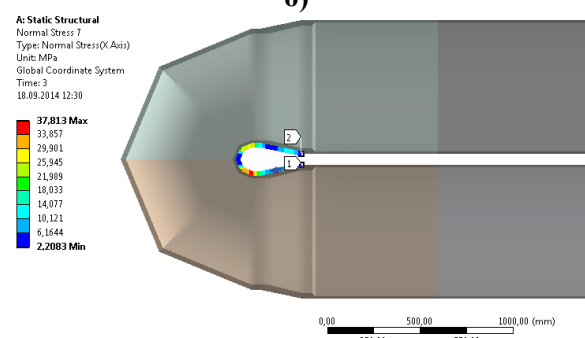
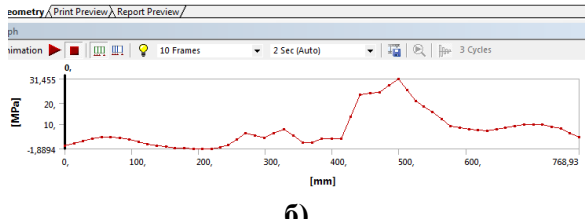
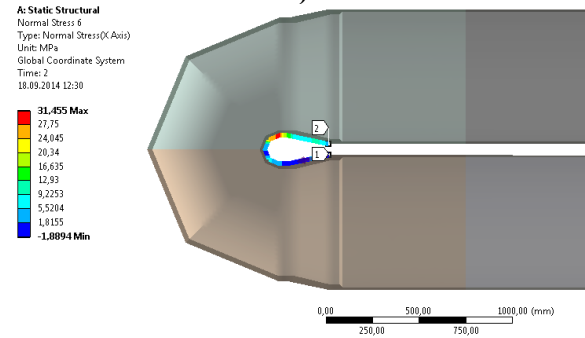
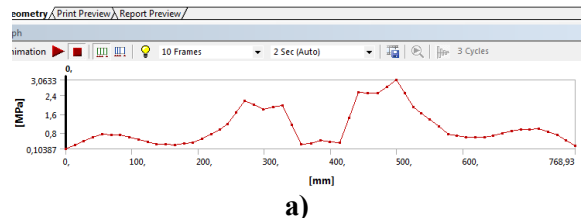
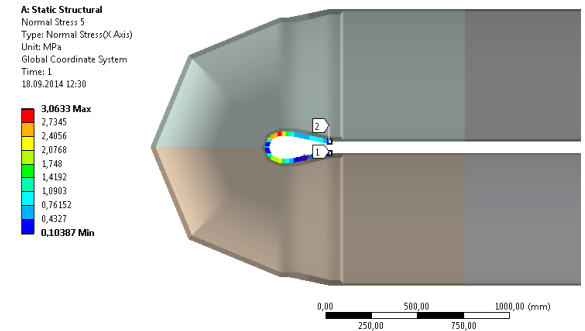


Рисунок 9 – Результати дослідження зміни осевих напружень по зовнішній поверхні стінки зони з'єднання досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу в початковий момент (а), після першої (б) та другої (в) години його заповнення

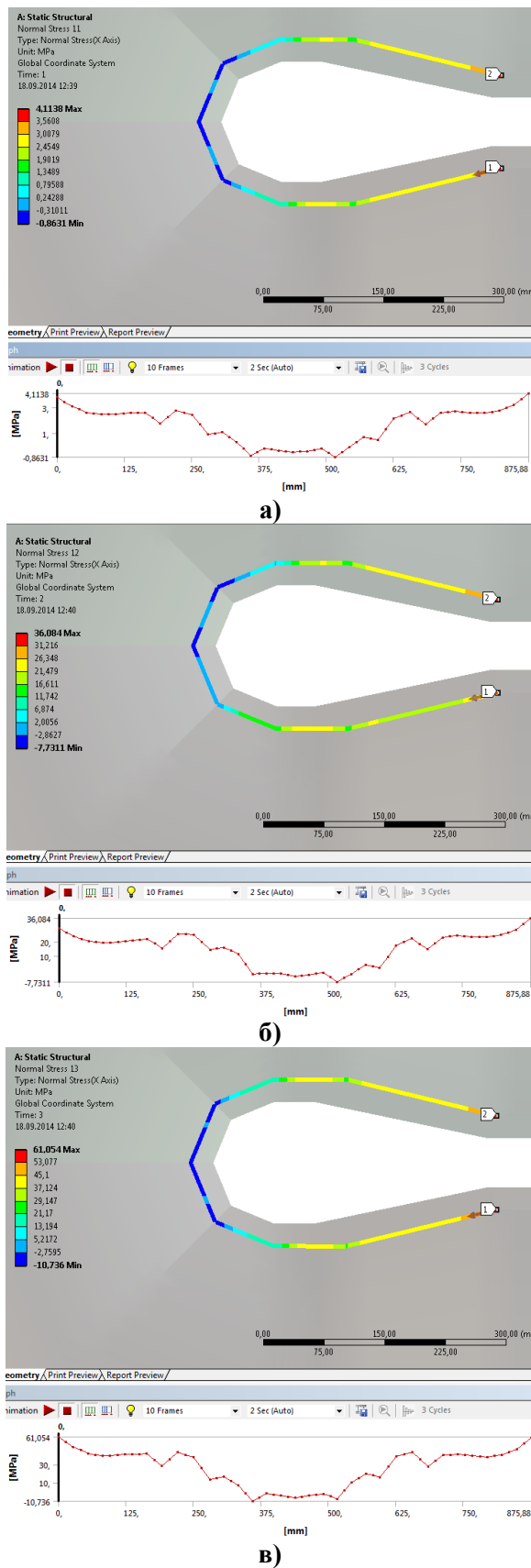


Рисунок 10 – Результати дослідження зміни осьових напружень по внутрішній поверхні стінки зони з’єднання досліджуваної ділянки рухомого трубопроводу в початковий момент (а), після першої (б) та другої (в) години його заповнення

4 Деклараційний патент на корисну модель № 67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомих трубопроводом / Патон Б. С., Крижанівський Є. І., Савицький М. М., Швидкий Е. А., Зайцев В. В., Мандрик О. М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201114580; заявл. 08.12.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.

5 CNG Offshore [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://cng.intari.com/>.

6 Перспективные суда и технические средства для нефтегазовой отрасли [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.vympel.ru/ru/publikaczii/10-publikaczii/110-perspektivnye-suda-i-texnicheskie-sredstva-dlya-neftegazovoj-otrasli>

7 Крижанівський Є. І. Концепція альтернативного постачання природного газу до України [Текст] / Є. І. Крижанівський, Вал. В. Зайцев // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 4 (37). – С. 5–13.

8 Бруйка В. А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: учебное пособие / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова, Н. А. Глазунова, И. Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

9 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.

10 Савицький М. М. Определение параметров облегченных стальных баллонов для грузовой системы CNG-газовозов [Текст] / М. М. Савицький, А. М. Савицький, В. А. Супруненко, Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Електронне видання Вісник НУК, зб. наук. праць – Миколаїв: НУК. 2013. – № 1. С. 4-14.

11 Івасів В. М. Оцінка впливу параметрів двочастотного процесу навантажування на довговічність деталей машин [Текст] / В. М. Івасів, В. І. Артим, П. В. Пвшкар // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – № 5 (37). – С. 113-116.

Стаття надійшла до редакційної колегії 03.09.14

Рекомендована до друку професором Крижанівським Є. І. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) д-ром техн. наук Банахевичем Ю. В. (відділ експлуатації ЛЧМГ ПАТ «Укртрансгаз», м. Київ)