

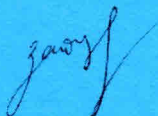
622.691(043)

3-17

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

ЗАЙЦЕВ ВАЛЕРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 622.691

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТИВНОГО
ТРАНСПОРТУВАННЯ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО
ГАЗУ МОРСЬКИМИ АКВАТОРІЯМИ**

**спеціальність 05.15.13 – трубопровідний транспорт,
нафтогазосховища**

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

ІВАНО-ФРАНКІВСЬК – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України



Науковий консультант доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
Крижанівський Євстахій Іванович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, ректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
Банахевич Юрій Володимирович,
ПАТ "УКРТРАНСГАЗ",
начальник відділу по експлуатації магістральних
газопроводів і газорозподільних станцій, м. Київ;

доктор технічних наук, професор
Голіков Володимир Антонович,
Одеська національна морська академія,
завідувач кафедри технічної експлуатації флоту,
проректор з наукової роботи, м. Одеса;

доктор технічних наук, професор
Уніговський Леонід Михайлович,
ТОВ "Нафтогазбудавтоматика", генеральний
директор, м. Київ

Захист відбудеться "19" листопада 2013 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.

Автореферат розісланий "15" жовтня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, Д 20.052.04
кандидат технічних наук, доцент

Пилипів Л.Д.



ГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

an2421

теми. Відповідно до стратегії розвитку нафтогазового комплексу України до 2030 року забезпечення прогнозованого споживання газу і джерел його покриття передбачає диверсифікацію імпорту, а також розгортання видобування природного газу українськими компаніями за межами України. Пріоритетними є ті країни, які мають значні резерви для розширення видобування газу на своїх територіях, зокрема Алжир, Єгипет, Іран, Лівія, Туркменістан та інші. Проте основним стримуючим фактором постає проблема транспортування цього газу до України.

Питання транспортування газу через морські акваторії надзвичайно актуальне для України і вимагає розроблення нових транспортних технологій та технічних засобів їх практичної реалізації. Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що для України найбільш прийнятним способом є транспортування природного газу у стиснутому стані за допомогою спеціальних суден (технологія CNG, від англ. Compressed Natural Gas) у порівнянні з підводними трубопроводами та транспортуванням у зрідженому стані (LNG – Liquefied Natural Gas).

У цьому переконує досвід спорудження і експлуатації газопроводу Росія-Туреччина "Голубий потік", значна частина якого (396 км) проходить по дну Чорного моря на глибинах понад 2000 м. Основні технічні труднощі, які суттєво звужують сферу практичного застосування підводних трубопроводів, пов'язані із високою металомісткістю, значними ризиками руйнування трубопроводу, складністю його практичної експлуатації, неможливістю проміжного компримування газу, невирішення питань ремонтів, ліквідації гідратних пробок тощо.

Інша альтернативна технологія транспортування газу через морські акваторії у зрідженому стані є ефективною для великих вантажопотоків і на сьогодні є доволі розповсюдженою, проте також характеризується низкою недоліків, зокрема вимагає створення дорогої і технологічно складної інфраструктури.

Тому створення наукових основ ефективного транспортування природного газу у стиснутому стані (технологія CNG) морськими акваторіями за допомогою спеціальних суден є актуальним і важливим завданням. Для його вирішення необхідно розробити нові методи розрахунків, проектування і конструювання ключових конструктивних вузлів та елементів таких суден включаючи їх вантажні відсіки та виробити рекомендації до їх практичної реалізації. Успішне розв'язання цього завдання дозволить забезпечити економічно ефективне транспортування природного газу через морські акваторії із зовнішніх альтернативних джерел, вирішити актуальне завдання диверсифікації імпорту природного газу і посилити рівень енергетичної та економічної безпеки України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дану роботу виконано в рамках загального плану наукових досліджень Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки № 6 Державної науково-технічної програми "Сучасні технології і ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і агропромисловому комплексі" та НДР № 187/2009 "Розроблення техніко-економічних пропозицій постачання стиснутого природного газу на територію України з африканських країн

(Лівія, Алжир і інші)", яку виконано на замовлення НАК "Нафтогаз України" (номер держреєстрації 0109U008172), держбюджетної НДР № 1716 "Підвищення ефективності морського транспортування стиснутого природного газу (CNG) на основі модульних конструкцій"(номер держреєстрації 0109U002222), яку було виконано у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, НДР № 30/2012 "Транспортування природного газу у компримованому вигляді через Каспійське море", яку виконано у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

Мета і завдання дослідження. *Мета дослідження* – розробка наукових основ ефективного транспортування стиснутого природного газу морськими акваторіями за допомогою спеціальних суден-газовозів, суден-контейнеровозів та барж.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання дослідження:

1. Провести аналіз методів транспортування природного газу морськими акваторіями.
2. Розробити теоретико-методологічні засади формування технологій транспортування стиснутого природного газу через морські акваторії та сформувані масив концептуальних рішень такого транспортування суднами-контейнеровозами, баржами та носіями на повітряній подушці (НПП).
3. Розробити основи розрахунків та проектування елементів рухомих трубопроводів для транспортування стиснутого газу.
4. Розробити основи розрахунків та проектування CNG-модулів з балонами високого тиску та дослідити їх масогабаритні характеристики.
5. Розробити принципи розміщення модулів на суднах і їх з'єднання у "рухомий трубопровід".
6. Розробити основи розрахунку та проектування суден-носіїв рухомих трубопроводів, їх пристроїв і систем.
7. Провести економічну оцінку системи морського транспортування стиснутого природного газу з використанням CNG-контейнеровозів та барж.

Об'єктом дослідження є процес переміщення стиснутого природного газу морськими акваторіями суднами-контейнеровозами, баржами та носіями на повітряній подушці, до складу яких будуть входити рухомі трубопроводи.

Предметом дослідження є проектування, розрахунок і конструювання рухомих трубопроводів та їх носіїв для транспортування стиснутого природного газу морськими акваторіями.

Проблема, яка вирішується – швидке альтернативне постачання природного газу в Україну.

Методи дослідження:

- теорія тонких оболонок та метод кінцевих елементів (МКЕ) – при розробці основ розрахунків і проектування елементів ємностей суден-носіїв та рухомих трубопроводів для транспортування стиснутого газу, елементів рухомих трубопроводів високого тиску і при вивченні їх напружено-деформованого стану (НДС);

- теорія і методи розрахунку м'яких оболонок – при дослідженні параметрів гнучких огорожень носіїв рухомого трубопроводу на повітряній подушці;

- системного аналізу – при виборі загальної методології дисертаційного дослідження.

Положення, які виносять на захист:

1. Концепція транспортування CNG за допомогою рухомих трубопроводів на основі CNG-модулів, розташованих на різних судах-носіях різних типів, які дозволяють транспортувати стиснутий природний газ з меншими затратами ніж за допомогою традиційних засобів.

2. Комплексні основи проектування, конструювання і розрахунків рухомих трубопроводів.

3. Комплексні засади проектування і конструювання суден-носіїв рухомих трубопроводів.

Наукова новизна отриманих результатів. При розробленні наукових основ ефективного транспортування природного газу у стиснутому стані через морські акваторії отримані наступні результати.

1. Вперше розроблено теоретико-методологічні засади формування технологій транспортування стиснутого природного газу через морські акваторії і концепцію транспортування стиснутого природного газу за допомогою контейнеровозів та інших типів суден, що передбачає використання спеціальних модулів стандартних розмірів, як у ролі контейнерів для мультимодальних операцій, так і у ролі стаціонарних смонтей для магістрального транспортування.

2. Вперше розроблено комплексні основи проектування, конструювання і розрахунків рухомих трубопроводів, конічно-циліндричних, конічно-сферичних, циліндро-конічно-сферичних та здвосних циліндричних елементів рухомих трубопроводів та розроблено основи проектування CNG-модулів.

3. Вдосконалено методики проектування та розрахунку міцності CNG-балонів для CNG-модулів. Дослідженням масогабаритних характеристик модулів доведено, що для CNG-газовозів необхідно використовувати балони виготовлені з композиційних полімерних матеріалів, які мають суттєво кращі характеристики в порівнянні з металевими балонами.

4. Вперше розроблено основи розрахунків та комплексні засади проектування суден-носіїв для рухомих трубопроводів, їх пристроїв та систем, модуля високого тиску у вигляді елемента трубопроводу. Обґрунтовано принципи розміщення та з'єднання CNG-модулів у рухомий трубопровід.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення досліджень полягає в тому, що:

- використання концепції транспортування стиснутого природного газу за допомогою суден-контейнеровозів дозволяє швидко організації транспортування природного газу з нових джерел постачання, морських промислів на початковій стадії експлуатації за відсутності технологічних газопроводів або у випадках технічної чи економічної недоцільності їх спорудження.

- використання результатів дослідження, які отримані в роботі, а саме методів розрахунку міцності елементів рухомих трубопроводів, методів аналізу процесу транспортування стиснутого природного газу за допомогою рухомих трубопроводів, НДС їх елементів за допомогою МКЕ дають можливість інженерам, конструкторам, проектувальникам, студентам проводити аналіз міцності, а також виявляти і використовувати їх резерви міцності, конструювати і будувати

рухомі трубопроводи на основі більш достовірних і сучасних методів, а також підвищувати кваліфікацію інженерів-кораблебудівників і інженерів, які зайняті проектуванням об'єктів та систем трубопровідного транспорту.

Практичне використання результатів дисертаційної роботи відображено у актах впровадження таких підприємств і організацій: НАК "Нафтогаз України" у вигляді звіту про НДР № 187/2009 "Розроблення техніко-економічних пропозицій постачання стиснутого природного газу на територію України з африканських країн (Лівія, Алжир і інші)", яку виконано Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу на замовлення НАК "Нафтогаз України" (номер держресстрації 0109U008172) (ДП "НДІ нафтогазової промисловості" НАК "Нафтогаз України" довідка від 11.09.2013); ПАТ "Чорноморсуднопроект" (м. Миколаїв) у вигляді методики проектування і розрахунку модуля рухомого трубопроводу та методики проектування суден-носіїв рухомих трубопроводів (акт від 26.03.2013); Інститут електровзарювання імені Є. О. Патона НАН України у вигляді методик проектування і розрахунку модуля рухомого трубопроводу та елементів рухомих трубопроводів (акт від 29.03.2013); АТ "Суднобудівний завод "Залів" (м. Керч) у вигляді методики проектування і розрахунку модуля рухомого трубопроводу і методики проектування і розрахунку елементів рухомих трубопроводів (акт від 11.04.2013); ДП "Суднобудівний завод ім. 61 комунара" (м. Миколаїв) у вигляді методики проектування і розрахунку елементів рухомих трубопроводів, методики проектування і розрахунку модуля рухомого трубопроводу і методики проектування суден-носіїв рухомих трубопроводів (акт від 18.04.2013). Крім того, результати досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри морських технологій, використані при виконанні дипломних проектів і магістерських робіт у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) зі спеціальності "Кораблі та океанотехніка" (акт від 08.01.2013); у навчальний процес кафедри транспорту та зберігання нафти і газу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (акт від 04.04.2013); у навчальний процес кафедри технічної експлуатації флоту Одеської національної морської академії (акт від 09.04.2013); у держбюджетну НДР № 1716 "Підвищення ефективності морського транспортування стиснутого природного газу (CNG) на основі модульних конструкцій (номер держресстрації 0109U002222, акт від 28.03.2013).

При побудові рухомих трубопроводів, які розміщені на суднах-носіях, підприємства України можуть використовувати у виробництві розрахунки, методики, рекомендації і конструкторські розробки, які базуються на виконаних дослідженнях. Це дасть можливість виробляти в Україні рухомі трубопроводи та їх носії.

Запатентована в Україні конструкція баржі вантажопідйомністю 11090 т дозволить транспортувати за один рейс на 23 % більше природного газу, що складатиме біля 1 млн. м³ газу, а річний економічний ефект від використання однієї такої баржі складає до 56 млн. USD (при вартості газу 400 USD за 1000 м³).

Особистий внесок здобувача. Всі положення і висновки, математичні моделі і методи розрахунків, аналітичні залежності та результати розрахунків, що виносяться на захист, розроблені і належать особисто авторові. Роботи [2, 4-6, 8-11, 15, 22, 39, 43, 48, 51] опубліковані одноосібно. З робіт, опублікованих у спів-

авторстві, на захист виносяться тільки ті частини, які розроблені особисто автором. В роботі [7] розроблено методику автоматизованих розрахунків гідродинамічних характеристик балансирних і небалансирних рулів рульових пристроїв суден-носіїв рухомих трубопроводів. В роботах [20, 52] виконано ескізне проектування CNG-модуля для CNG-контейнеровозів, розроблені алгоритм і програма розрахунків, що дозволяють за заданих температури і тиску метану, визначати густину метану, виконано розрахунки напружень за Мізесом для CNG-балона. В роботах [21, 24, 36, 37, 44, 46, 47] розроблені методики і виконано розрахунки міцності елементів рухомих трубопроводів різних конструкцій, проведено аналіз впливу на їх конструктивні параметри тиску газу в рухомому трубопроводі, а також впливу тиску газу на вантажні танки суден-газовозів, досліджено масогабаритні характеристики циліндричних танків-газовозів, які в свою чергу є суднами-носіями рухомих трубопроводів. В [3, 33] виконано аналіз економічної ефективності можливості проектування та побудови суден-газовозів на суднобудівних заводах м. Миколаєва. В [1, 41] доведено можливість і запропоновано концесію транспортування стиснутого природного газу підводними CNG-газовозами. У роботі [17, 32] здобувачеві належать розрахунки і аналіз результатів проведеної оптимізації елементів флоту газозовів. Постановка та вирішення проблеми зменшення собівартості транспортування газу в межах технологічного ланцюга від видобування до доставки кінцевому споживачу за рахунок використання модуля суднового рухомого трубопроводу, розробка математичної моделі визначення його техніко-економічних параметрів належать автору в статті [23]. В роботах [12-14, 16, 34, 35, 38, 40, 42, 49, 50] особисто здобувачеві належать розроблені математичні моделі проектування суден на повітряній подушці, їх гнучких огорожень, на яких можуть бути розміщені модулі рухомих трубопроводів. В [25, 45] автором виконано комплектацію морських контейнерів CNG-балонами. В роботі [19] здобувач зробив аналіз вимог іноземних класифікаційних товариств до суден, які перевозять CNG. Низку конструкторсько-технологічних рішень, запропонованих автором, захищено Патентами України [26-31].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації було апробовано і схвалено на: Міжнародному науково-практичному симпозіумі "Проблеми суднобудування: стан, ідеї, рішення" (Україна, Миколаїв, 8 – 10 жовтня 1997 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції: "Новости научной мысли – 2006" (Україна, Дніпропетровськ, 1-15 листопада 2006 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції: "Становление современной науки – 2006" (Україна, Дніпропетровськ, 16-30 жовтня 2006 р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи" (Україна, Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р.); "Ninth International Conference on Marine Sciences and Technologies "Black sea 2008" (Varna, Bulgaria, 23-25 October 2008); Міжнародній науково-методичній конференції "Автоматизація суднобудівного виробництва та підготовка інженерних кадрів: стан, проблеми, перспективи" (Україна, Миколаїв, 26-27 червня 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу" (ППТНГ-12), (Україна, Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012 р.); 3-й Міжнародній науково-технічній кон-

ференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Україна, Миколаїв, 4-6 жовтня 2012 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю "Підводна техніка і технологія" (Україна, Миколаїв, 30-31 жовтня 2012 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції "Актуальні проблеми будівництва та архітектури" (Україна, Миколаїв, 10-12 грудня 2012 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю "Современные технологии проектирования, постройки, эксплуатации и ремонта судов, морских технических средств и инженерных сооружений" (Україна, Миколаїв, 22-24 травня 2013 р.); Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного технічного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна, Миколаїв, 26-28 квітня 2006 р.; 23-25 квітня 2008 р.; 24-26 березня 2010 р.); на засіданнях кафедри морських технологій Національного технічного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна, Миколаїв). Робота доповідалася на наукових Радах НАК "Нафтогаз України" (Київ, 2010, 2011). У повному обсязі робота доповідалася на розширеному науково-технічному семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2013).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 52 роботи, з яких 2 статті за кордоном (з них – 1 без співавторів), 23 статті у фахових наукових виданнях, які рекомендовані МОН України для публікацій результатів дисертаційних досліджень (з них – 9 без співавторів), в 6 патентах України на корисну модель у співавторстві, в 21 тезах за матеріалами Міжнародних наукових, науково-практичних, науково-методичних конференцій (з них – 4 за кордоном; 4 без співавторів; 2 такі, що занесені у науково-метричну базу).

Обсяг і структура дисертації. Робота складається зі вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаної літератури з 222 найменувань, сімох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 284 сторінок та включає 139 рисунків і 42 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, розкрито її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Вказано особистий внесок автора у виконання дисертаційної роботи. Сформульовано мету і завдання дослідження, проблему, яку вирішується. Описано об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, положення, які виносяться на захист. Наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації автора за її темою. Вказано обсяг і структуру дисертації.

У першому розділі дисертації проведено аналіз запасів, видобування і споживання природного газу в різних регіонах світу, перспективи розвитку газовидобування і імпорту газу з території північної Африки. Для України потенційними перспективними джерелами альтернативного постачання природного газу є такі країни, як Алжир, Лівія і Єгипет. Тому за наявності засобів транспортування природного газу з цих країн на територію України стає можливим диверсифікувати джерела імпорту, а також набувають реальної перспективи проекти участі вітчизняних компаній у видобуванні природного газу на території країн північної Аф-

рики на базі угод про розподіл продукції. Для довідки, ціна алжирського природного газу для Італії на кордоні Алжиру складає 176 євро за 1000 м³.

Проведено аналіз запасів природного газу в Україні, розглянуто питання видобування, транспортування і споживання природного газу у різних регіонах світу. Показано, що в даний час основним видом транспорту газу є трубопровідний. Крім нього використовують судна-газовози, на яких газ перевозять у зрідженому стані. Цей вид транспорту вважають економічно обґрунтованим при відстанях транспортування понад 3000 км.

На основі порівняльного аналізу різних способів морського транспортування природного газу доведено, що за комплексом техніко-економічних критеріїв з урахуванням специфічних умов України поряд з підводними трубопроводами та LNG перспективним є спосіб транспортування природного газу у стиснутому стані (CNG).

Технологія CNG – це нова технологія морського транспортування природного газу на спеціальних судах – судах CNG. Особливість технології в тому, що природний газ можна завантажувати на судна CNG безпосередньо з родовища, а розвантажувати – безпосередньо в мережу споживання. Це виключає необхідність значних капітальних вкладень у будівництво морських трубопроводів або заводів зі зріджування газу та його регазифікації, як це має місце при застосуванні технології LNG. Основним об'єктом капіталовкладень у новій технології транспортування є саме судна CNG. Технологія CNG особливо приваблива для початкових стадій введення в комерційний оборот морських (офшорних) родовищ природного газу. В результаті аналізу переваг і недоліків різних способів морського транспортування природного газу та оцінки витрат (рис. 1) встановлено діапазон раціонального застосування технології CNG.

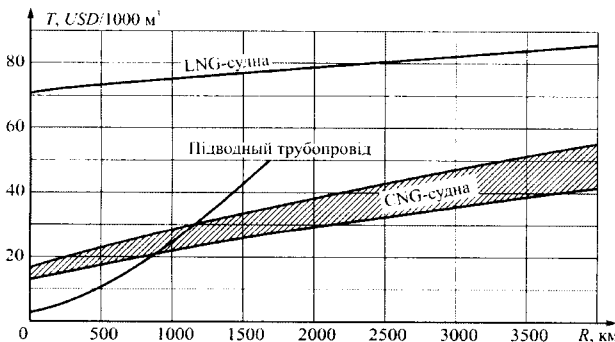


Рисунок 1 – Залежність витрат на морське транспортування газу від відстані

У даний час в процесі проектування і підготовки до впровадження перебувають шість схем перевезення CNG: Coselle (Coiled pipes around carousels – труби, навиті навколо барабанів); VOTRANS (Volume Optimized Transportation System) – це єдина сучасна CNG система, в якій передбачено зниження температури транспортування газу до мінус 30 °С з метою підвищення її ефективності (тиск в смонтованих, які будуть виготовляти зі сталі і розташовувати вертикально на борту судна, близько 13 МПа); Knutsen – система, в якій газ перевозиться у вертикальних або

горизонтальних балонах за таких умов: тиск 25,0 МПа і температура навколишнього середовища; CNG Shuttle-CNG, у якій газ буде транспортуватися в горизонтально розташованих на борту судна трубах при тиску 20,0...25,0 МПа і температурі навколишнього середовища; Gas Transport Modules (модулі транспортування газу – GTM) – система розроблена з використанням композитних матеріалів.

Зроблено аналіз особливостей вимог класифікаційних товариств до суден, які перевозять стиснутий природний газ та Правил проходження Чорноморських проток. CNG-судна є новітнім типом суден-газовозів, проектування і будівництво яких повинні відповідати існуючим вимогам класифікаційних товариств. Виконано огляд і аналіз літературних джерел, присвячених питанням проектування, спорудження та експлуатації морських трубопроводів, а також нормативних документів таких країн, як Норвегія, США, Великобританія, Російська Федерація. З усіх правил найбільш жорсткі вимоги містяться в російських правилах, менш жорсткі – в британських та американських, а найменш жорсткими є норвезькі правила. При цьому норвезькі та російські правила, на відміну від британських і американських, поділяють ділянки трубопроводів на категорії і відповідно містять різні вимоги до цих ділянок.

Проведено аналіз публікацій, присвячених морським трубопроводам. Що стосується використання довгомірних труб в якості ємностей для транспортування газу на спеціальних судах-газовозах, то література, що описує їх, обмежується декількома патентами і невеликою кількістю публікацій за матеріалами конференцій і в наукових журналах. Це роботи Economides M., Fraccia, J.C., Gredell, M.E. Найбільш близькою до втілення в реальні конструкції є технологія під назвою "Coselle". У відомих на сьогодні патентах, крім навивки труби на котушку, описано ще декілька способів укладання довгомірної труби, в тому числі у вигляді просторового змійовика. Більш ранні публікації на цю тему викладено в роботах Н. Fowler і D. Holcombe та M.E. Gredell і M.A. Benson.

Визначено, що розрахунки тонких оболонок у складі елементів трубопроводного транспорту, незалежно від того наземний це трубопровід чи морський, розраховуються в основному у відповідності з теорією тонких оболонок. Також проведено аналіз публікацій, що стосуються проектування та конструювання суден-носіїв різних типів.

Проаналізовано різні методи вирішення задач визначення параметрів підводних морських трубопроводів. У більшості опублікованих вітчизняних робіт розглянуто морські умови прокладання трубопроводів, розрахунки міцності, втомні розрахунки тощо. У зарубіжній літературі також докладно досліджено всі ці питання. Однак відсутні результати теоретичних досліджень з транспортування стиснутого газу за допомогою довгомірних труб у ролі вантажних ємностей на судах. Також відсутні публікації з визначення техніко-економічних показників таких суден. Відсутні також і розрахункові експерименти, що дозволяють виявити особливості процесу навантаження цих довгомірних труб внутрішнім тиском від стиснутого газу, що транспортується. Відсутні як теоретичні, так і експериментальні роботи, які б дозволили досліджувати НДС цих специфічних ємностей та їх елементів.

Система Coselle, яка базується на транспортуванні CNG в трубах великої довжини, які намотані на спеціальні барабани, що дозволяє розглядати ємність

для зберігання газу не як посудину під тиском, а як трубопровід для якого застосовуються нижчі коефіцієнти запасу міцності, що покращує їх масогабаритний показник.

Виходячи з конструктивної доцільності і можливості використання різних типів суден для перевезення стиснутого природного газу пропонується вантажні ємності виготовляти у вигляді відрізків трубопроводу, які у змієвидній формі вкладаються у спеціальні модулі. Таким чином, з'єднані між собою модулі складають довгомірний трубопровід. В трюмах і на палубі судна в такий спосіб можна розмістити десятки кілометрів трубопроводу діаметром 720 мм. Таке поєднання модулів у тому числі модулів системи Coselle, що розміщуються на самохідному судні, або на баржі запропоновано називати рухомими трубопроводами. Ці конструкції володіють властивостями трубопроводів, але набувають додаткових властивостей у зв'язку із розміщенням їх на судах та переміщенням разом з ними. Судна, на яких розміщуються такі трубопроводи, запропоновано називати судна-носії.

Створення методів розрахунків, проектування і конструювання рухомих трубопроводів та суден-носіїв, теоретично обґрунтованих методик розрахунку впливу на них маршрутів та умов транспортування стиснутого газу, обсягу газу, що транспортується та його властивостей є актуальним і важливим завданням, успішне вирішення якого покликане забезпечити безпечну експлуатацію рухомих трубопроводів.

На основі системного аналізу зроблено висновок про об'єкт та предмет дослідження даної дисертаційної роботи, а також про те, що у такій постановці завдання дослідження проектування, розрахунку та конструювання рухомих трубопроводів, їх елементів і суден-носіїв вирішується вперше.

За своєю спрямованістю робота відповідає профілю наукових досліджень кафедри нафтогазового обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та кафедри морських технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, формулі і основним науковим напрямом спеціальності 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. Для відображення системності дослідження розроблено технологічну карту, яка відображає методологію виконання дисертації.

В другому розділі розроблено теоретико-методологічні засади формування технологій транспортування стиснутого природного газу через морські акваторії і концепцію транспортування стиснутого природного газу за допомогою контейнеровозів та інших типів суден, на яку автором отримано Патенти України [26, 28].

Особливість концепції, поперше, полягає в тому, що контейнеровоз завантажується на контейнерному терміналі морського порту спеціальними 20- або 40 футовими CNG-модулями (рис. 2), які містять ємності для зберігання стиснутого газу. Завантаження природним газом можна здійснювати також і на морських промислах безпосередньо в ємності модулів аналогічно завантаженню суден CNG. Очищений природний газ під тиском з родовища подається в магістральну систему завантаження судна-контейнеровозу. Труби магістральних трубопроводів об'єднують CNG-модулі у блоки, які розміщені на палубі і в трюмах контейнеровозу. Розвантаження газу безпосередньо в газотранспортну систему або підземне сховище газу здійснюється на відповідних терміналах.

При застосуванні CNG-модулів з балонами розвантаження може проводитися на контейнерному терміналі в морському порту України. З порту автомобілями або залізницею контейнери можуть транспортуватися в потрібний пункт. Це виключає необхідність значних капітальних вкладень у будівництво морських трубопроводів або заводів зі зріджування газу для доставки його на ринок на судах LNG, виключає необхідність будівництва або придбання спеціалізованих суден-газовозів CNG. Основним об'єктом капіталовкладень у запропонованій новій технології є CNG-модулі.

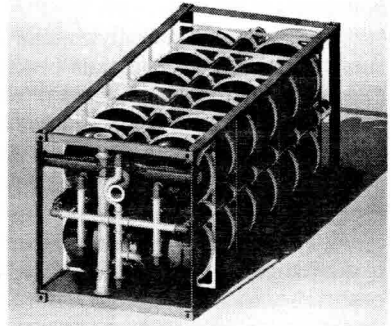


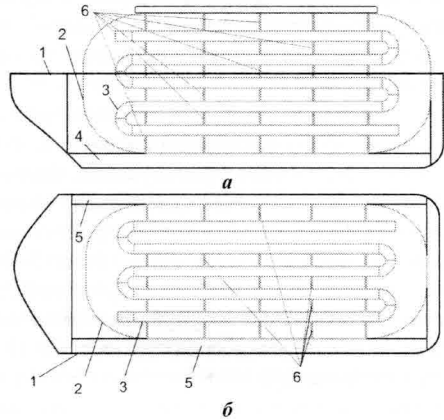
Рисунок 2 – CNG-модуль без зовнішньої обшивки та теплоізоляції

Процес транспортування стиснутого природного газу також може бути реалізований за допомогою суден-носіїв, в якості яких пропонуються судна-контейнеровози з модулями рухомих трубопроводів, баржі (рис. 3), судна на повітряній подушці (СПП), рис. 4, судна-газовози (рис. 5), підводні CNG-газовози. Рухомі трубопроводи пропонуються виготовляти у вигляді CNG-модулів (рис. 6), які можуть бути розміщені у спеціальних морських контейнерах, або у вигляді довгомірної труби високого тиску, яку укладено в трюмах та на палубі судна-носія.

Використання рухомих трубопроводів на суднах-контейнеровозах, є більш перспективним рішенням порівняно з технологією морського транспортування за допомогою спеціалізованих суден CNG. В цьому разі новим елементом технології морського транспортування стиснутого природного газу є самі переобладнані контейнеровози (CNG-контейнеровози) із спеціальними CNG-модулями.

Одним із основних елементів CNG-контейнеровоза є транспортна система, що забезпечує завантаження/розвантаження природного газу (система завантаження), його попередню підготовку, стиснення і зберігання в ємностях під тиском.

Одним з перспективних варіантів використання технології рухомого трубопроводу є розміщення його на баржі, та укладання в спеціальну капсулу (рис. 3).

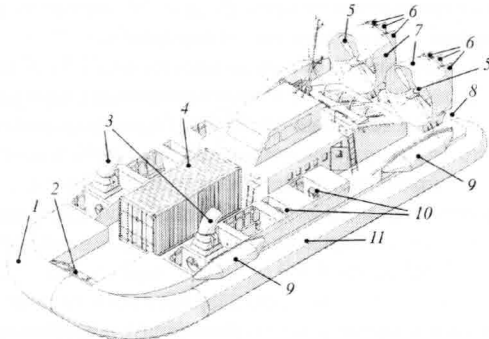


a – вид збоку; *б* – вид зверху;

- 1 – корпус; 2 – стінки капсули; 3 – просторовий змійовик; 4 – подвійне дно;
5 – подвійні борта; 6 – фіксатори.

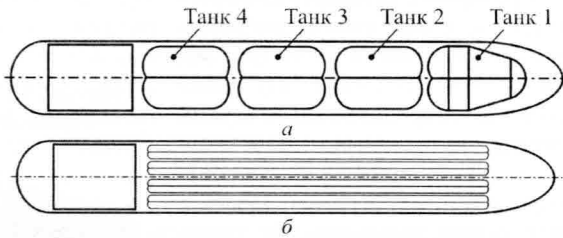
Рисунок 3 – Баржа для транспортування стиснутого природного газу

Баржа складається з корпусу 1, герметичної капсули 2 та просторового змійовика 3, укладеного в неї.



- 1 – носове гнучке огородження; 2 – апарель; 3 – носовий підрулюючий пристрій;
 4 – CNG-модуль; 5 – повітряний гвинт; 6 – комплекс вертикальних рулів;
 7 – профільована насадку повітряного гвинта; 8 – кормове гнучке огородження;
 9 – кранець; 10 – нагнітач; 11 – бортове гнучке огородження.

Рисунок 4 – СППА з CNG-модулем



- a* – вантажні танки на газозові; *б* – рухомі трубопроводи на судні-носії.

Рисунок 5 – Схеми розташування здвоєних вантажних смностей для транспортування газу

Для виконання вимог безпеки корпус 1 виконано з подвійним дном 4 та з подвійними бортами 5. У якості другого дна та других бортів використовують стінки капсули 2. Фіксують змійовик до фундаментів дна і бортів капсули жорстко за допомогою фіксаторів 6.

Природний газ під тиском закачують у просторовий змійовик 3 та у герметичну капсулу 2. Просторовий змійовик складається з послідовно сполучених прямолинійних та криволінійних відрізків труб, що чергуються, а герметична капсула має вигляд великогабаритної посудини.

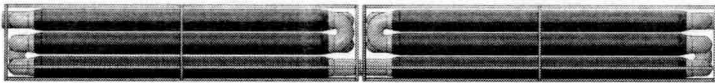


Рисунок 6 – CNG-модулі рухомого трубопроводу

У вільний простір герметичної капсули, в якій розміщена довгомірна труба, природний газ закачується для створення зовнішнього тиску на стінки труби, за-

вдяки чому зменшуються механічні напруження в матеріалі труби. Це дозволить заповнити баржу додатковим об'ємом газу. При збільшенні температури повітря при транспортуванні газу зовнішню частину капсули можна охолоджувати заборотною водою при допомозі спеціальних технічних засобів.

Запропонована конструкція баржі дозволить на 13 % збільшити об'єми природного газу, який транспортується, завдяки наявності капсули та на 10 % – завдяки підвищенню коефіцієнта розвантаження баржі порівняно з існуючими аналогами. За один рейс баржа вантажопідйомністю 11090 т зможе транспортувати на 23 % більше природного газу, що складатиме біля 1 млн. м³ газу. Річний економічний ефект від використання запропонованої баржі при можливості додатково перевозити до 140 млн. м³ природного газу в рік, складатиме до 56 млн. USD (при вартості газу 400 USD за 1000 м³).

Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомими трубопроводами з модулями, що полягає у його заповненні очищеним природним газом, перемішуванні його морським транспортним засобом і розвантажуванні у кінцевому пункті. Новим у цьому способі є те, що трубопровід складається з послідовно з'єднаних модулів (рис. 6), розміри яких співпадають з розмірами стандартних морських контейнерів (рис. 7) в яких компактно розташована довгомірна труба високого тиску (рис. 8). Операції завантаження/розвантаження газу здійснюються через систему трубопроводів, які зв'язують рухомий трубопровід з пунктами завантаження/розвантаження, при цьому рухомий трубопровід залишається на морському транспортному засобі.

Метою використання цього способу транспортування є здешевлення транспортування природного газу, зменшення вартості будівельно-монтажних робіт і зниження кінцевої ціни газу для споживачів. Ефективність способу транспортування стиснутого природного газу рухомими трубопроводами доведено розрахунками, які наведено у дисертації.

Встановлення CNG-модулів на судна на повітряній подушці амфібійного типу (СППА) дозволяє оперативно доставити природний газ у важкодоступний населений пункт, який потерпає від стихійного лиха чи техногенної катастрофи, і, таким чином вирішити проблему газопостачання за екстремальних умов. Особливістю СППА (рис. 4) є те, що під корпусом судна створюється область підвищеного тиску повітря, який створює підймальну силу, що дає змогу йому переміщуватися над будь-якою поверхнею (вода, лід, пісок, сніг, болото тощо), тому несприятливі природно-кліматичні чи інженерно-геологічні умови не заважають СППА виконати своє завдання. Розвантаження СППА може проводитися безпосередньо біля ТЕЦ або іншого теплопостачального вузла. Швидкість руху СППА середніх розмірів на рівних ділянках може досягати 40...50 вузлів (74...93 км/год.).

Основні конструктивні елементи суден на повітряній подушці амфібійного типу, які пропонуються для перевезення природного газу у стиснутому стані

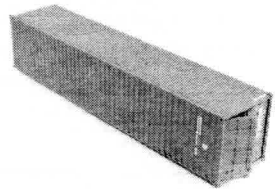


Рисунок 7 – Стандартний морський контейнер

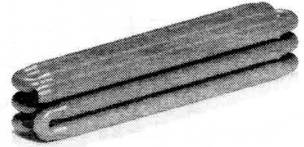


Рисунок 8 – Довгомірна труба одного CNG-модуля

(рис. 4) наступні: корпус, надбудова, рушійний комплекс (повітряні гвинти 5, профільовані насадки повітряних гвинтів 7), підймальний комплекс (гнучке огородження 1, 8, 11 і нагнітачі 10), засоби керування рухом (рулі 6 і підрулюючий пристрій 3). Корпус СШПА є жорсткою понтоною конструкцією, а для забезпечення неоптоплюваності в корпусі встановлені водонепроникні перебірки. У нижній частині корпусу розташований жорсткий ресивер, який розподіляє повітря між секціями повітряної подушки і секціями гнучкого огородження (ГО).

Для арктичних районів перспективно використовувати рухомі трубопроводи, які розміщені на підводних суднах. Такий трубопровід, як і у випадку надводного газозову, складатиметься із послідовно з'єднаних модулів (рис. 6), розміри, яких відповідають розмірам стандартних морських контейнерів. Кожен модуль складатиметься з рамної конструкції та просторового змійовика. Для полегшення конструкції пропонується основну частину змійовика виготовляти у вигляді двошарової композитної конструкції. Внутрішній шар – стандартні сталеві труби або перехідники, зовнішній шар – намотаний склопластик.

Можливо розміщувати рухомі трубопроводи на суднах-газовозах. Судна-газовози і рухомі трубопроводи зі здвоєними циліндричними і циліндроконічними елементами є одним з простих типів. Носіями для них є судна малої місткості. Технологія побудови таких суден була налагоджена в попередні десятиріччя багатьма суднобудівними верфями світу. Рухомі трубопроводи у таких суден-носіїв – здвоєної циліндричної форми (рис. 5, б) їх конструкція подібна до конструкції вантажних танків газозовів (рис. 5, а).

На основі проведеного аналізу світового досвіду використання існуючих типів балонів для транспортування CNG встановлено, що одним із шляхів підвищення конкурентоспроможності вітчизняних балонів є оптимізація їх характеристик за рахунок більш широкого використання вуглецевих або скляних волокон у конструкціях третього і четвертого типів, а також освоєння виробництва суцільнометалевих балонів з легованої сталі.

Однією із основних складових у загальній методиці досліджень є математичні моделі, які можуть будуватися або на основі теоретичних і експериментальних досліджень, або логічного аналізу, або попереднього досвіду. Для вирішення задач дисертаційного дослідження і забезпечення достовірності їх результатів використано методи побудови математичних моделей на основі теорій осесиметричних тонких і м'яких оболонок та методи побудови розрахункових моделей і виконання розрахунків на основі МКЕ.

Оздійснено систему об'язки балонів у модулі і модулів на судні-контейнеровозі. Описано транспортні можливості запропонованої системи морських перевезень стиснутого газу CNG-контейнеровозами на прикладі транспортування природного газу з алжирського порту на Середземному морі Шкікда (Skikda) до порту Іллічівськ на Чорному морі (протяжність лінії – 1650 миль або 3056 км; вантажомісткість одного контейнеровоза за один рейс – 4480 контейнерів). Економічна оцінка проводилась для запропонованої системи морського транспортування газу зафрахтованими контейнеровозами, і порівняння ціни російського газу, що поставлявся до України в березні 2013 року (416,6 USD/1000 м³), з ціною газу в українському порту Іллічівськ, доставленого контейнеровозами з алжирського порту Шкікда (Skikda). Доведено, що вартість транспортування газу на

лінії Шкікда (Skikda) – Іллічівськ складе 24,9 USD/1000 м³; питомі приведені витрати складуть без урахування втрат, пов'язаних із заморожуванням оборотних коштів, вкладених у газ на час його транспортування контейнеровозами 54,74 USD/1000 м³; транспортний тариф – 1,79 дол. США/1000 м³·100 км. Тариф на транспортування природного газу морем не перевищує тарифів на транспортування природного газу магістральними трубопроводами (середня ставка транзиту в Європі складає – 7,04 /1000 м³·100 км).

Економічні показники системи морського транспортування на тій же лінії такі: річна провозоспроможність 1-го контейнеровозу – 1,43 млрд. м³; річна провозоспроможність флоту з 7 контейнеровозів – 10,0 млрд. м³; питомі капіталовкладення в систему – 198,9 USD/1000м³; питомі капіталовкладення на 1км – 0,0651 USD/1000м³.

Основні економічні показники транспортування CNG рухомими трубопроводами на контейнеровозі для трьох маршрутів транспортування газу при провозоспроможності морської системи транспортування $P_{\phi}=5$ млрд. м³ з Єгипту (Дамієтта) до України (Іллічівськ, Чорноморськ, Феодосія) відповідно такі: протяжність, миль – 1145, 1144, 1206; тривалість рейсу, діб – 7,22, 7,22, 7,43; кількість суден, шт. – 4, 4, 5; собівартість переміщення газу, USD/1000 м³ – 4,78, 4,78, 4,98; собівартість транспортування з урахуванням амортизації, USD/1000 м³·100 км – 0,99...1,35; 0,99...1,35; 1,02...1,43; орієнтовна вартість модуля, USD – 54600...105700.

Таким чином, у розвиток технології CNG в дисертаційній роботі розроблено і обґрунтовано технічно, технологічно та економічно нову концепцію транспортування стиснутого природного газу, яка передбачає транспортування CNG за допомогою рухомого трубопроводу, розміщеного на баржі та в CNG-модулях, транспортування CNG в модулях з балонами на суднах-контейнеровозах, транспортування CNG за допомогою суден на повітряній подушці і за допомогою підводних носіїв рухомих трубопроводів.

У третьому розділі розроблено основи розрахунків та проектування елементів ємностей рухомих трубопроводів для транспортування стиснутого газу. Виконано дослідження конічно-циліндричних елементів ємностей. Як для вантажних танків, так і для рухомих трубопроводів основним елементом ємності є круговий циліндр у поєднанні з конусом і півсферою. Перехід від циліндричної до напівсферичної частини найчастіше здійснюється за допомогою перехідного конічного елемента (рис. 9). При перевезенні як стиснутого, так і зрідженого природного газу в циліндричних ємностях їх конструктивні елементи, опори, а також деталі кріплення піддаються впливу цілого ряду динамічних і статичних навантажень і їх комбінацій. Одним з основних навантажень для циліндричних танків є розрахунковий тиск газу для вкладних танків типу С, які відповідають вимогам, висунутим до посудин під тиском, а для рухомих трубопроводів – це розрахунковий внутрішній тиск стиснутого газу (20...25 МПа).

Математична модель розрахунку конічно-циліндричного елемента складається відповідно до розрахункової схеми (рис. 10) із системи рівнянь з залежностями для циліндричної і конічної частин оболонки елемента рухомого трубопроводу і вантажного танка судна-газовозу, граничних умов для вузла стикування частин оболонки.

Отримано розрахункову систему чотирьох рівнянь з чотирма невідомими інтегрування, розв'язання яких дає вирази для чотирьох постійних інтегрування, вирази для головних напружень для частин оболонки. Результати вирішення задачі для вантажних танків представлено на рис.

II за таких вихідних даних: $\delta_{\text{Ц}} = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_{\text{К}} = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0,28$; $p = 5,4 \cdot 10^5$ Па; $R = 6,9$ м; $\theta = 60^\circ$ (де $\delta_{\text{Ц}}$, $\delta_{\text{К}}$ – товщини оболонки циліндричної і конусної частин, м; E – модуль пружності матеріалів оболонок, які виготовлено з однакового матеріалу, Па; μ – коефіцієнт поперечної деформації; R – радіус циліндричної частини, м; θ – кут нахилу твірної конусної частини, градус; p – розрахунковий тиск газу, Па). Результати розрахунку для рухомого трубопроводу отримано за таких вихідних даних: $\delta_{\text{Ц}} = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_{\text{К}} = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0,28$; $p = 200 \cdot 10^5$ Па; $R = 0,36$ м; $\theta = 80,91^\circ$ (рис. 12). Аналіз розрахунків дозволяє сформулювати рекомендацію до проектування конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів: кут нахилу твірної його конусної частини θ повинен бути більший ніж 80° .

Виконано дослідження конічно-сферичних елементів ємностей суден-носіїв та рухомих трубопроводів для транспортування газів (рис. 13). Конічно-сферичні елементи рухомих трубопроводів розташовують на їх кінцевих ділянках. Вантажні танки суден-газовозів, які розташовані в їх носовій частині, з метою раціонального використання матеріалу конструкції і місткості газозовів також проєктують і виготовляють з конічно-сферичними закінченнями. Математична модель розрахунку конічно-сферичного елемента складається відповідно до розрахункової схеми (рис. 14) з системи рівнянь аналогічно до математичної моделі конічно-циліндричного елемента.

Отримано розрахункову систему шести рівнянь з шістьма невідомими інтегрування, розв'язання яких дає вирази для шести постійних інтегрування, вирази для головних напружень для частин оболонки. Результати вирішення задачі для вантажних танків представлено на рис. 15 за таких вихідних даних: $\delta_{\text{С}} = 60 \cdot 10^{-3}$

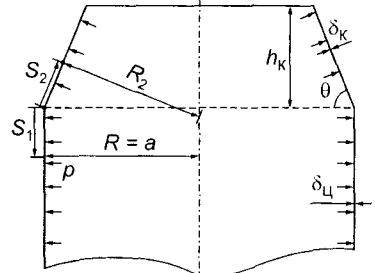


Рисунок 9 – Схема конічно-циліндричного елемента рухомого трубопроводу і вантажного танка судна-газовозу

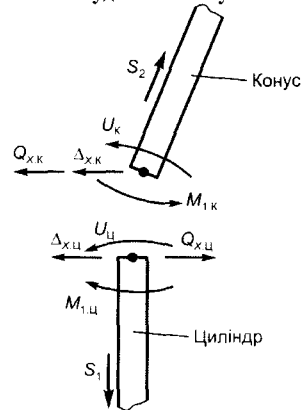
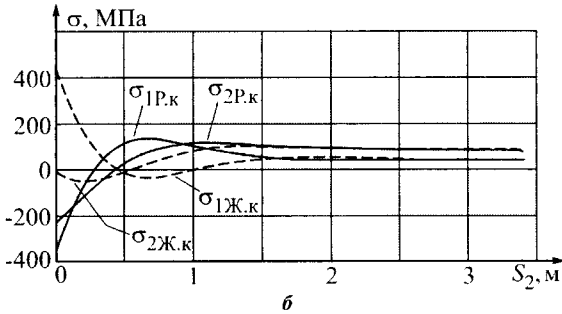
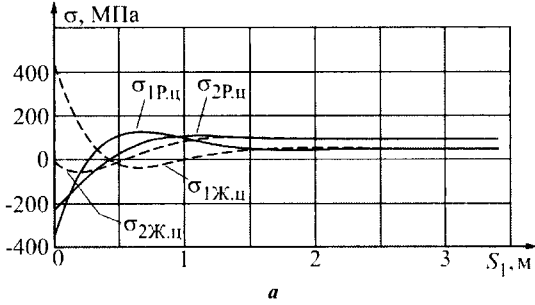


Рисунок 10 – Розрахункова схема стискання циліндричної і конічної частин оболонки елемента рухомого трубопроводу і вантажного танка судна-газовозу

$m; \delta_k = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}; E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \mu = 0,28; p = 5,4 \cdot 10^5 \text{ Па}; R_C = 7,1 \text{ м};$
 $\theta_k = 68^\circ; \theta_0 = 68^\circ; a = 9 \text{ м}$ (де δ_C, δ_k – товщини оболонок сферичної і конічної частин, м; Па; θ_k – кут нахилу твірної конічної частини оболонки, градус; θ_C – кінцевий кут для сферичної частини оболонки, градус; a – радіус основи конічної частини оболонки, м; R_C – радіус сферичної частини оболонки, м).



a – для циліндричної частини; b – для конічної частини.

Рисунок 11 – Графіки залежностей головних напружень від координат S_1 і S_2 для оболонок танків суден-газовозів

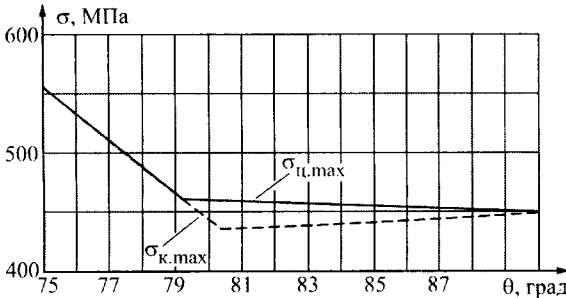


Рисунок 12 – Сумісний графік максимальних напружень в елементі рухомого трубопроводу

Результати розрахунку для рухомого трубопроводу отримані за таких вихідних даних: $\delta_c = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_k = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0,28$; $p = 200 \cdot 10^5$ Па; $h_k = 0,52$ м; $\theta_k = \theta_0 = 80,91^\circ$; $a = 0,36$ м (рис. 16). Аналіз розрахунків дозволяє сформулювати рекомендацію до проектування конічно-сферичних елементів рухомих трубопроводів: кут нахилу твірної конічної частини θ повинен бути більшим ніж 80° .

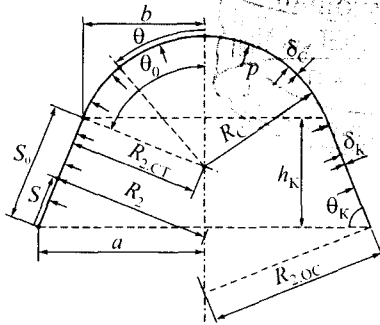


Рисунок 13 – Схема конічно-сферичного елемента рухомого трубопроводу і вантажного танка судна-газовоза

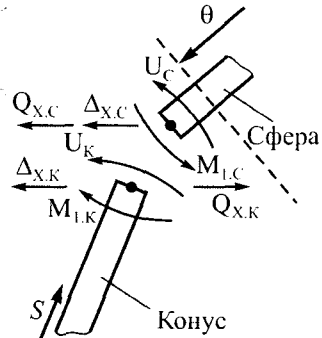
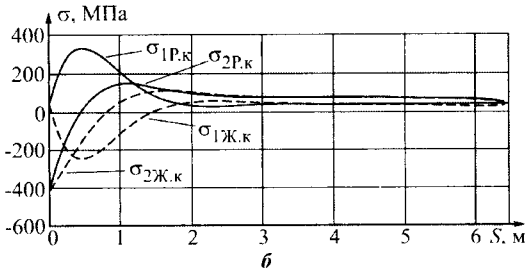
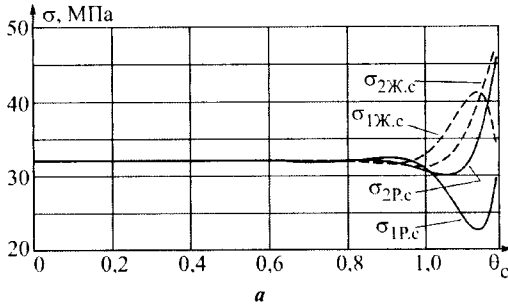


Рисунок 14 – Розрахункова схема стикування сферичної і конічної частин елемента рухомого трубопроводу і вантажного танка судна-газовоза

Виконано дослідження циліндро-конічно-сферичних елементів ємностей для транспортування газів (рис. 17, 18). Спільний розгляд в одній задачі вузла рухомого трубопроводу з циліндричним, конічним і сферичним елементами дозволить отримати більш повне уявлення про їх НДС в порівнянні з будь-яким поєднанням двох з цих елементів. Математична модель розрахунку циліндро-конічно-сферичного елемента складається відповідно до розрахункової схеми (рис. 19). Отримано розрахункову систему восьми рівнянь з вісьмома невідомими інтегрування, розв'язання яких дає вирази для восьми постійних інтегрування, вирази для головних напружень для частин оболонки.

Результати вирішення задачі представлені на рис. 20 – 22 при наступних вихідних даних: $\delta_c = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_k = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_{ц} = 16 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0,28$; $p = 200 \cdot 10^5$ Па; $h_k = 0,52$ м; $\theta_k = \theta_0 = 80,91^\circ$ (де h_k – висота конусної частини оболонки, м). Отримані графіки свідчать, що в місцях стикування елементів рухомого трубопроводу виникають сплески напружень, які гаснуть у міру віддалення від цих стиків.

Проведено дослідження здвоєних циліндричних і циліндро-конічних елементів ємностей суден-носіїв та рухомих трубопроводів для транспортування газів (див. рис. 5). Судна-газовози і рухомі трубопроводи зі здвоєними циліндричними і циліндро-конічними елементами є одним з простих типів. Носіями для них є судна малої місткості. Рухомі трубопроводи у таких суден-носіїв – здвоєної циліндричної форми (див. рис. 5, б).



a – для сферичної частини; *б* – для конічної частини.

Рисунок 15 – Графіки залежностей головних напружень в оболонці вантажного танка від координат θ_c і S

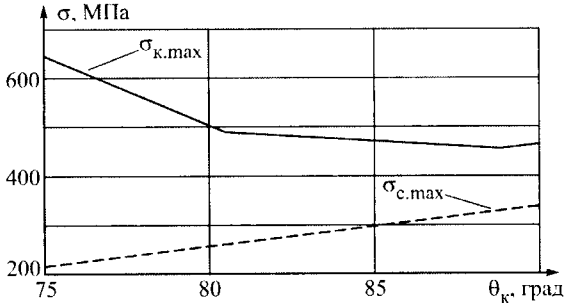


Рисунок 16 – Сумісний графік максимальних напружень в елементі рухомого трубопроводу

У вітчизняній практиці до цього часу не розглядали питань проектування носіїв рухомих трубопроводів такого типу. Основні елементи здвосєних циліндричних і циліндро-конічних елементів танків та рухомих трубопроводів визначено на основі методу, розробленого Зайцевим В. В. для газозовів з призматичними танками.

Вантажна зона газозова обладнана двома різновидами танків. Танки (№ 2, 3, 4) середньої частини газозова складаються з таких трьох секцій: кормової, носової і середньої. Аналогічна конструкція здвосєних рухомих трубопроводів (рис. 5, б). Носовий танк (№ 1) складається з чотирьох секцій: кормової, носової і двох середніх. Кормові і носові секції танків № 2, 3, 4 (рис. 23) і здвосєних рухомих трубоп-

роводів являють собою дві однакові півсфери, що перетинаються, центри яких рознесено на відстань меншу, ніж їх діаметр. Зазвичай відстань $a = 1,2R$ (60 % від діаметра півсфери).

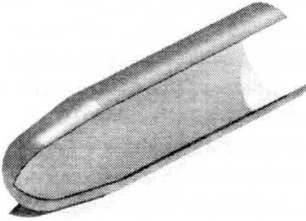


Рисунок 17 – Циліндро-конічно-сферичний елемент рухомого трубопроводу

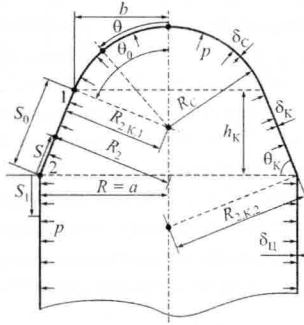


Рисунок 18 – Схема циліндро-конічно-сферичного елемента оболонки рухомого трубопроводу

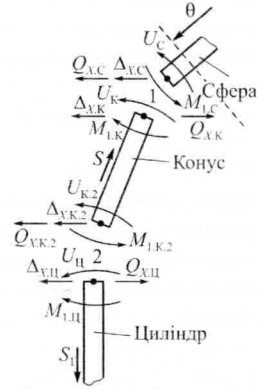


Рисунок 19 – Схема стикування циліндричної, конічної та сферичної частин оболонки елемента рухомого трубопроводу

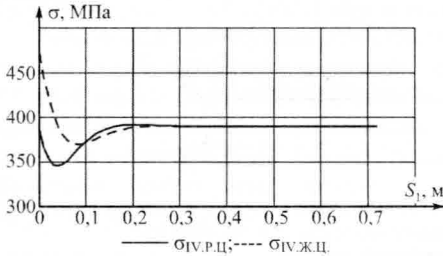


Рисунок 20 – Розтягуючі і стискаючі напруження за Мізесом для циліндричної частини елемента рухомого трубопроводу

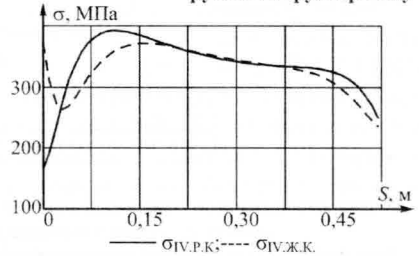


Рисунок 21 – Розтягуючі і стискаючі напруження за Мізесом для конічної частини елемента рухомого трубопроводу

Лінії перетину півсфер утворюють верхню і нижню лінії поздовжньої вертикальної перебірки. Середні секції танків № 2, 3, 4 і здвоєних рухомих трубопроводів являють собою два однакових круглих циліндра, що перетинаються, радіуси яких дорівнюють радіусам півсфер кормових і носових секцій. Лінії перетину циліндрів утворюють верхню і нижню лінії поздовжньої вертикальної перебірки.

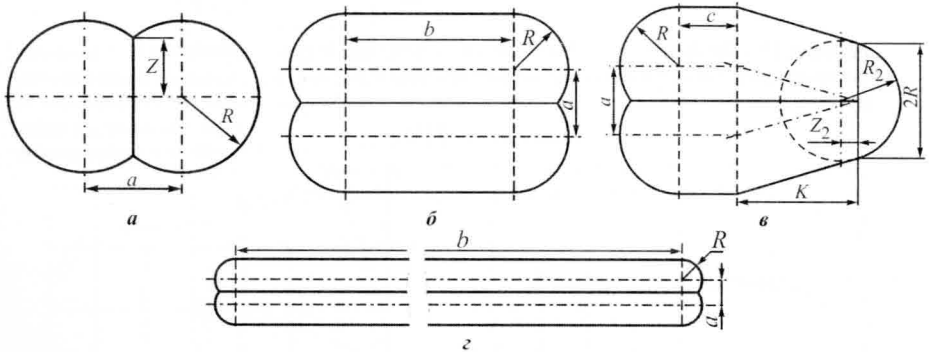
Дослідження здвоєних циліндричних і циліндро-конічних елементів смонтеї суден-носіїв та рухомих трубопроводів для транспортування газів проводилось виходячи із заданої вантажомісткості газозову W_3 і кількості вантажних танків n , які розташовані на ньому. На основі наведених в дисертації залежностей було проведено розрахунок для газозову із заданою вантажомісткістю $W_3 = 20000 \text{ м}^3$ і кількістю танків $n = 4$. За результатами розрахунків побудовано графічні зображення танків в ізометрії.

Виконано оптимізацію параметрів здвоєних рухомих трубопроводів. За критерій оптимізації прийнято коефіцієнт повноти міделевого перетину секції здвоєного рухомого трубопроводу (рис. 24):

$$k = S_{\text{tank}} / (2R(a + 2R)),$$

де S_{tank} – площа міделевого перетину секції здвоєного рухомого трубопроводу, м^2 ; R – радіус циліндра, м ; a – міжцентрова відстань циліндрів, м .

Аналіз отриманої залежності показує, що коефіцієнт повноти, k , залежить тільки від відношення міжцентрної відстані циліндрів до радіуса циліндра, α . У графіка залежності k від α один екстремум (рис. 25).



a – міделевий перетин середнього танку; b – середній танк (вид зверху); c – носовий танк (вид зверху); d – секція здвоєного рухомого трубопроводу (вид зверху).

Рисунок 23 – Геометричні характеристики здвоєних циліндричних і циліндро-конічних елементів рухомих трубопроводів і вантажних танків суден-газовозів

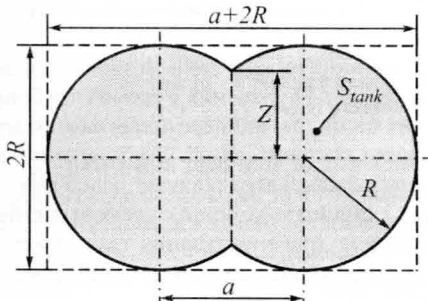


Рисунок 24 – До визначення коефіцієнта повноти міделевого перетину секції здвоєного рухомого трубопроводу

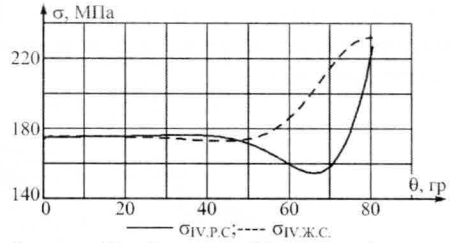


Рисунок 22 – Розтягуючі і стискаючі напруження за Мізесом для сферичної частини елемента рухомого трубопроводу

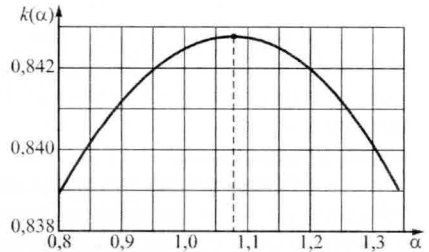


Рисунок 25 – Залежність коефіцієнта повноти міделевого перетину секції здвоєного рухомого трубопроводу від відношення міжцентрної відстані циліндрів до радіуса циліндра

У четвертому розділі розроблено основи розрахунків та проектування CNG-модулів з балонами високого тиску та їх елементів, визначено передумови проектування та розрахунку на міцність CNG-балонів, проведено аналіз нормативної документації, яка необхідна для розрахунків їх міцності.

На основі вимог діючих стандартів, зокрема ГОСТ 14249-89, а також з урахування властивостей природного газу та умов експлуатації як самих вантажних ємностей, так суден-носіїв, отримано математичні залежності для визначення геометричних параметрів циліндричних і сферичних елементів та розроблено алгоритм і програму для визначення основних геометричних та експлуатаційних параметрів CNG-балонів.

Для прикладу виконано розрахунок параметрів балонів з фіксованими довжиною і діаметром при різних значеннях робочого тиску і для різних матеріалів. Для наочної візуалізації розрахунків побудовано ряд графіків та проаналізовано отримані результати. Розроблено параметричну 3D-модель CNG-балону (рис. 26) та виконано його перевірочний розрахунок на основі розробленої методики з використанням МКЕ. В якості параметрів прийнято такі геометричні розміри балона: довжина циліндричної частини $L_B = 5,619$ м; зовнішній діаметр $D_B = 1,084$ м; товщина циліндричної частини $t_{ц} = 45,8$ мм; товщина сферичної частини $t_{сф} = 22,4$ мм; $P_{раб} = 25$ МПа; матеріал балону – сталь X80. За даними аналізу результатів розрахунку доведено адекватність розроблених математичних моделей та доцільність їх застосування при проектуванні CNG-балонів.

Виконано проектування CNG-балонів для CNG-модулів та проведено дослідження їх масогабаритних характеристик. Використовуючи вимоги ГОСТ 14249-89, дані про властивості метану та математичні залежності для визначення геометричних параметрів циліндричних і сферичних фігур отримано залежності для визначення основних геометричних та експлуатаційних параметрів CNG-балонів. Визначено частку маси метану $M_{газ}$ у повній масі балону з метаном $M_{B\Sigma} : k = M_{газ} / M_{B\Sigma}$.

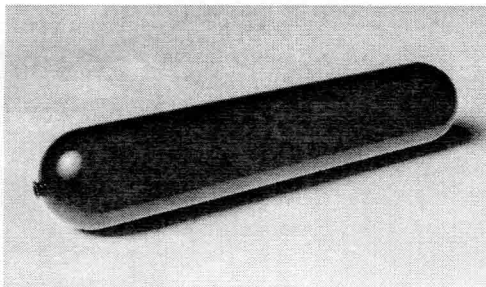


Рисунок 26 – Параметрична 3D-модель CNG-балона

Для прикладу виконано розрахунок параметрів балонів при $L_B = 5,619$ м та $D_B = 1,084$ м для різних матеріалів та різних значень робочого тиску. Вплив на величину k робочого тиску та матеріалу балонів показано на графіках рис. 27, побудованих за результатами розрахунків відповідно до отриманих автором залежностей.

Розроблено методику проектування CNG-модулів з балонами. Концепція транспортування природного газу за допомогою CNG-контейнеровозів передбачає завантаження природного газу в модулі, які будуть еквівалентні за габаритними розмірами стандартним морським 20-футовим контейнерам (див. рис. 7). Можливе застосування 40-футових контейнерів. На даному етапі метою проектування CNG-модулів є створення модуля з найбільшою місткістю з урахуванням його раціональної ваги і технологічності виготовлення. Для подальшого вивчення було розглянуто 4 варіанти компоновки модуля CNG-балонами (рис. 28 – 31). Для кожного варіанту компоновання було враховано наступне: між балонами і стінками модуля має бути відстань для ізоляції (у більшості випадків було прийнято 50 мм); в передній частині модуля має бути місце для розведення внутрішньої арматури модуля, яка з'єднує всі балони в єдину систему (для зручності схемам компоновання балонів у модулі надано такі назви: "1+4"; "4+5"; "9+4"; "16+9"). Товщини стінок балонів та інші характеристики балонів визначалися відповідно до методики, викладеної в розділі 4.3 дисертації. Робочий тиск – $P_{\text{раб}} = 25$ МПа, у якості матеріалу прийнятий склопластик ПВМН-10 тому, що балони з металевих матеріалів будуть надто важкими, а балони з вуглепластику занадто дорогими.

Для вирішення питання, яка зі схем компоновання краща, була проведена експертна оцінка з урахуванням "ваги" кожної з розглянутих характеристик: внутрішній об'єм балонів, маса їх матеріалів, складність виготовлення і транспортування балонів. За результатами оцінки зроблено висновок, що найкращою є схема компоновання "4+5", для якої зроблено детальне опрацювання конструкції і визначені основні статті вагових навантажень CNG-модуля і розрахована його загальна маса. Після цього створено методику проектування CNG-модулів для транспортування стиснутого природного газу.

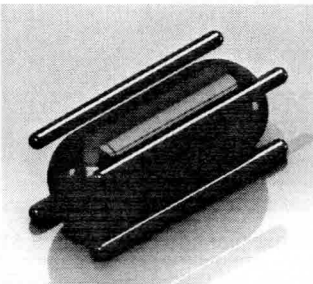


Рисунок 28 – Схема компоновання "1+4"

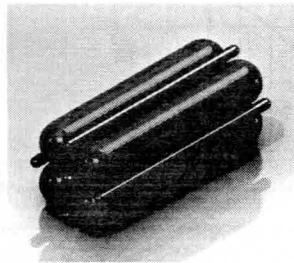


Рисунок 29 – Схема компоновання "4+5"

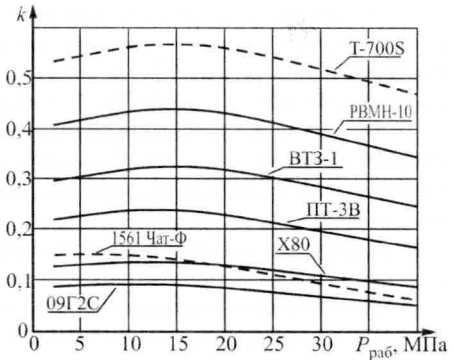


Рисунок 27 – Залежність частки маси металу в повній масі балона з метаном від робочого тиску та матеріалу балонів

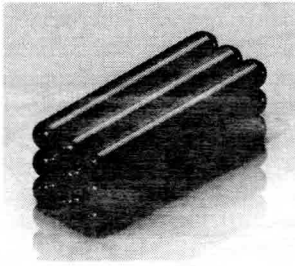


Рисунок 30 – Схема компоновання
"9+4"

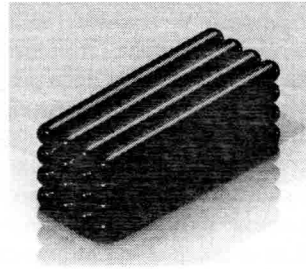


Рисунок 31 – Схема компоновання
"16+9"

Визначено параметри модуля рухомого трубопроводу у першому наближенні і створено математичну модель для визначення у першому наближенні параметрів модуля рухомого трубопроводу (рис. 32), який включає у себе сталевий і склопластиковий шари. Основою для створення математичної моделі слугували ескізні проробки модуля, патенти [30, 31] та рекомендації до проектування конструкції подібних типів.

За допомогою математичної моделі отримано параметри модуля рухомого трубопроводу: сумарна довжина циліндричної частини довгомірної труби – 86 м; об'єм вантажного простору в змійовику – 38,826 м³; маса газу в змійовику – 6512 кг; маса модуля з газом – 25141 кг; масова досконалість змійовика – 0,449 кг/л; об'єм газу в трубі при н.у – 9705 м³; вартість модуля – 94306 USD; питома вартість модуля – 2,429 USD/літр.

Експлуатація рухомих трубопроводів на Каспійському морі обмежена застосуванням для цих цілей суден-носіїв водотоннажністю до 70000 тонн. Для таких суден орієнтовно місткість – 1250 модулів, швидкість ходу – 20 вузлів. Відстань між портами завантаження і вивантаження складе не більше 200 км (108 миль). Обсяг газу, що транспортується за нормальних умов на такому судні за один рейс – 12,1 млн. м³. Для транспортування 5 млрд. м³ газу у рік достатньо мати 2 судна-носія місткістю по 1250 модулів кожен. Капіталовкладення у модульний парк складуть 235,75 млн. USD.

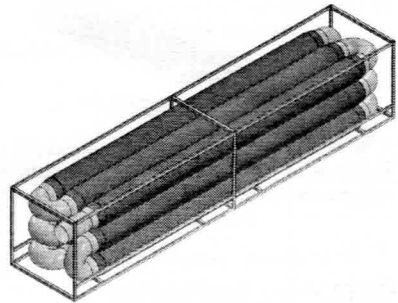


Рисунок 32 – Ізометрія модуля просторового змійовика рухомого трубопроводу

Основні елементи змійовика – циліндричні композитні відрізки труб, конусні перехідники з частково намотаним по довжині склопластиковим шаром і тороїдальні сталеві коліна (рис. 33). Для уточнення конструктивних параметрів модуля рухомого трубопроводу необхідно досліджувати місцеву міцність деяких елементів рухомих трубопроводів у складі змійовика, а також врахувати те, що рухомий трубопровід – композитна конструкція.

Отримані в першому наближенні геометричні параметри змійовика дозволили створити його розрахункову 3D-модель для перевірки місцевої міцності (рис. 34). Для зменшення ресурсоемності рішення задачі за допомогою МКЕ в розрахунковій моделі врахована симетричність навантажень і симетричність геометрії, що дозволило створити оптимізовану розрахункову 3D-модель змійовика (рис. 35). На підставі цієї моделі створена сіткова модель, у якій враховані місця можливих концентрацій напружень. Розрахунки за МКЕ у першому наближенні показали, що товщини для циліндричної і конічної частин змійовика були обрані правильно, тому що максимальні напруження в цих елементах близькі до напружень, що допускаються, але не перевищують їх. У більшій частині тороїдального коліна напруження не перевищують допустимих. Винятком є невелика зона в районі стику конічного і тороїдального елементів змійовика.

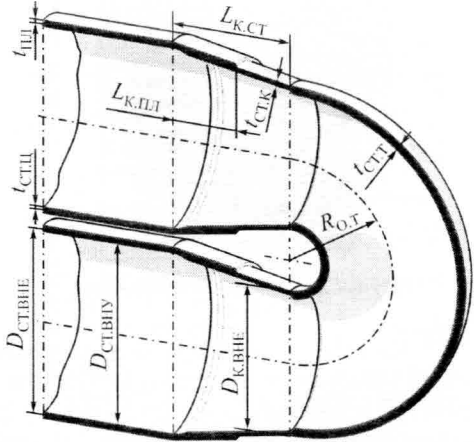


Рисунок 33 – Ескіз змійовика у районі тороїдального коліна рухомого композитного трубопроводу

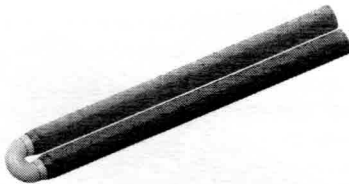


Рисунок 34 – Розрахункова 3D-модель змійовика рухомого композитного трубопроводу

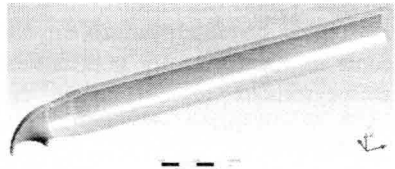
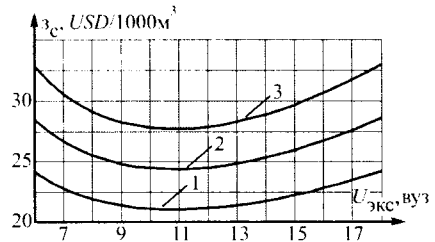


Рисунок 35 – Оптимізована розрахункова 3D-модель змійовика рухомого композитного трубопроводу

У п'ятому розділі розроблено основи розрахунків та проектування судноносіїв рухомих трубопроводів, їх пристроїв і систем. Зокрема розроблено методику оптимізації головних розмірів носіїв рухомих трубопроводів і газозовів з циліндричними танками та методику оптимізації їх основних техніко-технологічних та експлуатаційних параметрів.

Згідно з отриманими результатами розрахунків (табл. 1, рис. 36-38) бачимо, що оптимальна швидкість судна-носія не залежить від відстані між портами завантаження і розвантаження судна-носія рухомого трубопроводу і вона приблизно в 2 рази менша, ніж максимальна специфікаційна швидкість цього судна. Оптимальні приведені витрати лінійно зростають, а транспортний тариф лінійно зменшується в залежності від збільшення відстані між портами завантаження і розвантаження судна-носія. На головні розміри і основні елементи судна-носія відстань між портами завантаження і розвантаження майже не впливає.

В дисертаційній роботі розроблено основи проектування спеціальних пристроїв носіїв рухомих трубопроводів, а саме процедуру автоматизованого проектування їх рульових пристроїв. Визначено вплив кількості ярусів ГО на параметри форми і НДС багатоярусних ресиверів ГО СПП, тому що найважливішим спеціальним пристроєм судна-носія на повітряній подушці є його ГО. Для цього розглянуто м'які оболонки одноярусного, двоярусного, триярусного, чотириярусного ресиверів ГО, які навантажені ступінчастим тиском повітря.



1 - відстань між портами 300 миль; 2 - відстань між портами 400 миль; 3 - відстань між портами 500 миль.

Рисунок 36 – Залежність приведених витрат судна-носія від експлуатаційної швидкості

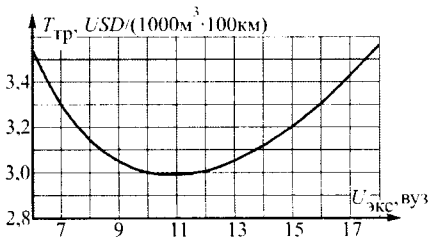


Рисунок 37 – Залежність транспортного тарифу від експлуатаційної швидкості для відстані між портами 500 миль

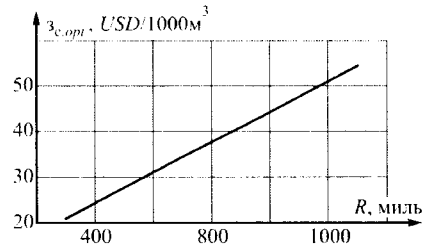


Рисунок 38 – Залежність оптимальних приведених витрат судна-носія від відстані між портами

Таблиця 1 – Основні параметри оптимізованого судна-носія

Назва величини	Позначення	Значення	
		$R_{п.в} = 300$	$R_{п.в} = 500$
Оптимальна швидкість, вузли	$U_{екс.опт}$	10,85	10,85
Максимальна специфікаційна швидкість, вузли	U_{max}	23,53	23,54
Довжина судна-носія, м	L	229,11	229,16
Ширина судна-носія, м	B	34,03	34,04
Осадка судна-носія, м	T	11,47	11,48
Висота борту судна-носія, м	H	21,76	21,77
Дедвейт, т	DW	56385	56430
Повна водотоннажність, т	D	76430	76488
Приведені витрати, $USD/1000m^3$	z_c	21,01	27,69
Транспортний тариф, $USD/(1000m^3 \cdot 100km)$	$T_{тр}$	3,78	2,99

Описано систему завантаження та розвантаження CNG-суден з CNG-модулями та її блок-схему. Склад і параметри такої системи будуть значною мірою визначатися специфікою проекту морського транспортування газу, для якого

передбачається використовувати судно CNG, звідки буде завантажуватися на судно CNG природний газ і куди він буде розвантажуватися. Розміщення CNG-модулів в системі зберігання газу в стиснутому стані і їх об'єднання в рухомий трубопровід має відповідати "вантажному плану" морського судна. Вантажний план судна-носія рухомого трубопроводу повинен створюватися виходячи із загальних вимог до оптимального розміщення вантажів, при цьому повинні бути враховані умови майбутніх рейсів.

Розроблено принципи розміщення CNG-модулів на суднах-носіях з урахуванням умов безпечної експлуатації судна, що потрібно враховувати при складанні вантажного плану таких суден. Запропоновано конструктивні елементи для з'єднання модулів у рухомий трубопровід. Проведено розрахунки та аналіз динаміки розвантаження рухомого трубопроводу з трьома схемами об'єднання CNG-модулів у рухомий трубопровід, та запропоновано найкращу з них.

У додатках наведено методи проектування, розрахунку і рекомендації до проєктування і експлуатації рухомих трубопроводів та суден-носіїв. Наведено програми розрахунку фізико-хімічних властивостей метану, параметрів CNG-балонів, методики проектування і розрахунку елементів рухомих трубопроводів, проєктування і розрахунку модуля рухомого трубопроводу, проєктування суден-носіїв рухомих трубопроводів, акти впровадження результатів дисертаційної роботи в промисловість, у навчальний процес вищих навчальних закладів України і науково-дослідні теми.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішено важливу науково-прикладну проблему транспортування стиснутого природного газу (CNG) через морські акваторії самохідними суднами та баржами в балонах високого тиску або в рухомих трубопроводах.

В результаті проведеного дисертаційного дослідження одержано такі основні результати

1. Відповідно до енергетичної стратегії розвитку нафтогазового комплексу України до 2030 року для забезпечення диверсифікації постачання природного газу з врахуванням віддаленості джерел постачання, протяжності та складності маршруту і виходячи з динаміки розвитку світового ринку природного газу аналіз методів транспортування природного газу морськими акваторіями показав, що поряд з підводними трубопроводами та LNG перспективним для України є метод транспортування CNG.

2. Для швидкої організації транспортування природного газу з нових джерел постачання, морських промислів на початковій стадії експлуатації за відсутності технологічних газопроводів або у випадках технічної чи економічної недоцільності їх спорудження вперше розроблена "концепція транспортування стиснутого природного газу за допомогою суден-контейнеровозів". Базовими засобами транспортування є самохідні судна, включаючи підводні та несамохідні баржі з певними переобладнаннями, які здатні перевозити вантажі у формі контейнерів. Єм-

ностями для транспортування і зберігання CNG пропонуються балони високого тиску для мультимодальних операцій, та модулі рухомого трубопроводу для магістрального транспортування.

3. Створені математичні моделі елементів рухомих трубопроводів дозволили розробити методики їх розрахунків для початкового проектування модулів рухомих трубопроводів. Розрахунки і аналіз, що проведено за допомогою МКЕ дозволили уточнити методику проектування цих модулів і довели достовірність викладених в ній аналітичних залежностей. Розраховані техніко-економічні параметри модулів рухомих трубопроводів доводять економічну доцільність їх використання для транспортування природного газу.

4. Доведено, що при мультимодальних операціях транспортування CNG суднами-контейнеровозами необхідно використовувати CNG-модулі з балонами виготовленими з композиційних полімерних матеріалів. Тільки за цих умов модулі за своїми масогабаритними характеристиками відповідають вимогам, що висуваються до морських контейнерів. Для такого способу транспортування стиснутого природного газу розроблено методику проектування CNG-модулів з балонами на базі 20- і 40 футових контейнерів. Обґрунтовано оптимальну схему компоновки CNG-модуля з балонами для якої розроблено основні конструктивні рішення щодо проектування внутрішньої і зовнішньої трубопроводної обв'язки CNG-модулів.

5. Доведено, що розміщення CNG-модулів на судах повинно враховувати динаміку розвантаження та завантаження рухомого трубопроводу. При складанні вантажного плану для забезпечення остійності судна потрібно планувати початок завантаження з трюмної частини рухомого трубопроводу, а потім продовжувати його в палубній частині. Розвантаження потрібно проводити в зворотному порядку. Запропоновано для компенсації температурних та інших деформацій з'єднувати CNG-модулі рухомого трубопроводу гнучкими рукавами. Розроблена оптимальна схема об'єднання CNG-модулів у рухомий трубопровід. Доведено, що запропонована схема дозволяє розвантажувати судно-носіїв рівномірно, а крен, диферент і остійність зберігаються у допустимих межах.

6. Встановлено, що оптимальна швидкість судна-носія рухомого трубопроводу не залежить від відстані між портами завантаження і практично не впливає на головні розміри і основні елементи судна-носія, що дозволяє ефективно використовувати спроектоване судно в широкому діапазоні дистанцій. Обґрунтовано для суден-носіїв рухомих трубопроводів склад, елементи та функції системи завантаження.

7. Економічна оцінка системи морського транспортування CNG суднами-контейнеровозами і баржами показала, що в діапазоні відстаней від 200 до 3000 км транспортування буде в 1,5...2,0 рази економічно більш вигідним порівняно з транспортуванням по морських трубопроводах або в зрідженому стані на судах LNG. Очікуваний річний економічний ефект від побудови 9...12 суден-носіїв з рухомими трубопроводами при транспортуванні 5 млрд. м³ природного газу на лінії протяжністю 250 км складає 500...700 млн. дол. США.

Список опублікованих праць здобувача за темою дисертації

Статті опубліковані за кордоном

1. Kryzhanivskyy, Ye.I. About the possibility of transportation of compressed natural gas by submarine carriers of mobile pipelines in Arctic / Ye.I. Kryzhanivskyy, Val.V. Zaytsev, O.M. Mandryk // Scientific Buletin Seria C, Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology. - Baia Mare, Romania: Universitatea de Nord din Baia Mare, 2012. - Volume № XXVI. - P. 28-30.

2. Зайцев Вал. В. Определение конструктивных параметров модуля судового подвижного композитного трубопровода с помощью МКЭ / Вал. В. Зайцев // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал. Спецвыпуск – Санкт-Петербург: ООО "Научно-исследовательский центр "Морские интеллектуальные технологии", 2013. – № 1. – С. 84-86.

Статті опубліковані у наукових фахових виданнях

3. Зайцев В. В. Оценка возможности и целесообразности проектирования и строительства судов-газовозов судостроительной промышленностью Украины / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1998. – № 2 (350). – С. 59-68.

4. Зайцев Вал. В. Расчет параметров цилиндрических танков судов-газовозов / Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1998. – № 2 (350). – С. 53–59.

5. Зайцев Вал. В. Определение главных размерений судов-газовозов с цилиндрическими танками / Вал. В. Зайцев // Вестник ХГТУ. – Херсон: ХГТУ, 1998 – № 1(3). – С. 159 – 160.

6. Зайцев Вал. В. Оптимизация главных размерений судов-газовозов с цилиндрическими танками / Вал. В. Зайцев // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования. Сб. науч. тр. НАН Украины. Ин-т математики – Киев: Институт математики НАНУ, 1998 – С. 112 – 115.

7. Зайцев Вал. В. К автоматизированному проектированию рулевого устройства / Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1998 – № 4 (352). – С. 153-156.

8. Зайцев Вал. В. Автоматизированное проектирование рулевых устройств газозовозов / Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1998 – № 6 (354). – С. 48-53.

9. Зайцев Вал. В. Основные проблемы постройки судов-газовозов с цилиндрическими танками на судостроительных верфях Украины / Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1998 – № 10 (358). – С. 22-25.

10. Зайцев Вал. В. Расчет коническо-цилиндрического элемента грузового танка газозовоза / Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1998 – № 11 (359). – С. 18-25.

11. Зайцев Вал. В. Расчет коническо-сферического элемента грузового танка газозовоза / Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ. – 1999 – № 1 (361). – С. 22–31.

12. Зайцев Вал. В. Механіка трьохъярусного ресивера гнбкого огорадження

- СВП / Вал. В. Зайцев, О. В. Пономаренко // Судовождение: Сб. науч. трудов – Одесса: Феникс, 2005. – Вып 9. – С. 29–35.
13. Зайцев В. В. Исследование влияния длины съемного элемента на напряженно-деформированное состояние носового гибкого ограждения / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць НУК, – Миколаїв: НУК, 2006. – № 3 (408) – С. 24-30.
14. Кувалдина О. В. Расчет многоярусных гибких ограждений скеговых судов на воздушной подушке / О. В. Кувалдина, В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць НУК, – Миколаїв: НУК, 2006. – № 4 (409) – С. 23-31.
15. Зайцев Вал. В. К проектированию цилиндрических танков судов-газовозов / Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008 – № 1 (418). – С. 88-91.
16. Зайцев Д. В. Создание экспериментальной установки для моделирования работы гибкого ограждения судна на воздушной подушке / Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, В. В. Лукашова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008 – № 6 (423). – С. 16-20.
17. Зайцев В. В. Оптимизация элементов флота газовозов при его эксплуатации в системе морской транспортировки газов / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев // Рыбное хозяйство Украины. Специальный выпуск – Керчь: КГМТУ, 2008. – С. 5-6.
18. Зайцев В. В. Начальное проектирование баллонов для CNG-газовозов / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев // Електронне видання Вісник НУК, зб. наук. праць – Миколаїв: НУК, 2010. – № 2. – С. 3-12. (Найти издание печатное за 2010 год).
19. Зайцев Вал. В. Анализ особенностей требований классификационных обществ к судам, перевозящим сжатый природный газ / Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев, Е. В. Котова, К. С. Скрипниченко // Зб. наук. праць НУК, – Миколаїв: НУК, 2010. – № 5 (434) – С. 11-18.
20. Крижанівський Є. І. Концепція альтернативного постачання природного газу до України / Є. І. Крижанівський, Вал. В. Зайцев // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – № 4 (37). – С. 5–13.
21. Зайцев Вал. В. Розрахунок міцності конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, О. М. Мандрик // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – № 3. – С. 187–192.
22. Зайцев Вал. В. Предварительная оптимизация модуля судового подвижного трубопровода / Вал. В. Зайцев // Автоматизация судовых технических средств: науч. –техн. сб.– Одесса: ОНМА, 2012. – вып. 18. С. 44-52
23. Мандрик О.М. Визначення техніко-економічних параметрів модуля рухомого трубопроводу / О.М. Мандрик, Вал.В. Зайцев // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. - № 1(46). - С. 179-186.
24. Зайцев Вал. В. Научные основы расчетов цилиндрико-коническо-сферических элементов подвижных трубопроводов / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Електронне видання Вісник НУК, зб. наук. праць – Миколаїв: НУК, 2012. – № 3. С. 126-132.
25. Савицкий М. М. Определение параметров облегченных стальных балло-

нов для грузової системи CNG-газовозов / 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.

Патенти

26. 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; 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.

27. Пат. 42693 Україна, МПК(2009) B67D 5/00 F17C 1/00. Транспортний CNG-модуль / Є. І. Крижанівський, В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u200903995; Заявл. 23.04.09; Опубл. 10.07.09 // Промислова власність. 2009. – Бюл. № 13.

28. Пат. 42694 Україна, МПК(2009) B67D 5/00 F17C 1/00. Спосіб морського транспортування стиснутого природного газу в CNG-модулях / Є. І. Крижанівський, В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u200903996; Заявл. 23.04.09; Опубл. 10.07.09 // Промислова власність. 2009. – Бюл. № 13.

29. Пат. 51969 Україна, МПК(2009) F17C 1/00. Композитний балон високого тиску / Є. І. Крижанівський, В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201000995; Заявл. 01.02.2010; Опубл. 10.08.2010 // Промислова власність. 2010. – Бюл. № 15.

30. Деклараційний патент на корисну модель № 67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом / Патон Б. Є., 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.

31. Деклараційний патент на корисну модель № 67658 Україна, МПК B63B 25/00. Баржа-пліт для транспортування стиснутого природного газу / Патон Б. Є., Крижанівський Є. І., Савицький М. М., П'ятничко О. І., Зайцев В. В., Мандрик О. М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201113979; заявл. 28.11.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.

Матеріали конференцій

32. Зайцев В. В. Оцінка економічної ефективності при проектуванні суденгазовозів / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев // Матеріали Міжнародного науково-практичного симпозиуму "Проблеми суднобудування: стан, ідеї, рішення": Миколаїв, 8 – 10 жовтня 1997 р. – Миколаїв: УДМУ, 1997. – С. 70-71.

33. Зайцев В. В. Можливості проектування та побудови суденгазовозів суднобудівною промисловістю України / В. В. Зайцев, А. Я. Казарезов, Вал. В. Зайцев // Матеріали Міжнародного науково-практичного симпозиуму "Проблеми суднобудування: стан, ідеї, рішення": Миколаїв, 8 – 10 жовтня 1997 р. – Миколаїв:

УДМТУ, 1997. – С. 71-72.

34. Зайцев Вал. В. Влияние угла скоса и высоты съемных элементов на напряжения в гибких ограждениях судов на воздушной подушке / Зайцев Вал. В., Ван Л. К., Зайцев Д. В. // Материалы I Международной научно-практической конференции "Становление современной науки-2006". Т. 1. – Технические науки: – Днепропетровск: Наука и образование, 2006. – С. 28–31.

35. Зайцев Вал. В. Исследование возможности снижения концентрации напряжений в гибких ограждениях судов на воздушной подушке / Вал. В. Зайцев, Ван Л. К. // Материалы I Международной научно-практической конференции "Новости научной мысли – 2006". Том. 5. Технические науки. – Днепропетровск: Наука и образование, 2006. – С. 18-20.

36. Зайцев В. В. Исследование массогабаритных характеристик цилиндрических танков судов-газовозов с помощью компьютерного моделирования / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, Ч. Т. Нгуен // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції "Європейська наука XXI століття: стратегія і перспективи розвитку – 2006". Том. 23. Технічні науки. – Днепропетровск: Наука і освіта, 2006. – С. 47-50.

37. Зайцев Вал. В. Применение численных методов при проектировании цилиндрических танков судов-газовозов / Вал. В. Зайцев, О. И. Малина // Автоматизация судостроительного производства и подготовка инженерных кадров: состояние, проблемы, перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции. – Николаев: НУК, 2007 – С. 147-149.

38. Зайцев Вал. В. Применение численных методов при проектировании гибких ограждений судов на воздушной подушке / Вал. В. Зайцев, О. В. Кувалина // Автоматизация судостроительного производства и подготовка инженерных кадров: состояние, проблемы, перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции. – Николаев: НУК, 2007 – С. 142-144.

39. Зайцев Вал. В. Определение параметров лейнера для баллонов типа CNG-4 / Вал. В. Зайцев // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції: – Миколаїв: НУК, 2010. – С.115-117.

40. Зайцев В. В. Учет влияния дрейфа, ходового дифферента и крена при расчете рулевого устройства СВПА / В. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Лукашова, Вал. В. Зайцев, Жан Лина // Підводна техніка і технологія: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 189-194.

41. Зайцев Вал. В. О возможности транспортировки сжатого природного газа с помощью подводных носителей подводных трубопроводов / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Підводна техніка і технологія: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 142-144.

42. Зайцев Д. В., Зайцев Вал. В., Зайцев В. В. Системы координат и их взаимосвязь при имитационном моделировании движения СВПА с шестью степенями свободы / Д. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Підводна техніка і технологія: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 144-149.

43. Зайцев Вал. В. Научные основы расчетов коническо-цилиндрических элементов подвижных трубопроводов / Вал. В. Зайцев // Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012 р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – С. 17-19.

44. Зайцев Вал. В. Определение прочностных характеристик цилиндрико-коническо-сферических элементов подвижных трубопроводов / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 135-138.

45. Савицкий М. М. Стальные баллоны для грузовой системы CNG-газовозов / М. М. Савицкий, А. М. Савицкий, В. А. Супруненко, Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 133-135.

46. Зайцев Вал. В. Исследование прочности коническо-цилиндрических элементов подвижных трубопроводов / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2012". – Выпуск 2. Том 1 Транспорт. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – ЦИТ:212-244. – С. 39-42.

47. Зайцев Вал. В. Исследование прочности коническо-сферических элементов подвижных трубопроводов / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, В. В. Зайцев // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012". – Выпуск 3. Том 1 Транспорт. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – ЦИТ:312-287. – С. 28-32.

48. Зайцев, Вал. В. Вычисление основных параметров модуля судового подвижного композитного трубопровода / Вал. В. Зайцев // Современные технологии проектирования, постройки, эксплуатации и ремонта судов, морских технических средств и инженерных сооружений: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2013. - С. 320-324.

49. Zaytsev Dmytriy. Calculation Stability of SES / Dmytriy Zaytsev, Valeriy Zaytsev // Thesis of International Conference on Fast Ships, 24-25 April 2005. – IRI, Shiraz, 2005 – p. 82.

50. Zaytsev Dmytriy. Calculation Stability of SES / Dmytriy Zaytsev, Valeriy Zaytsev // Materials of International Conference on Fast Ships. – IRI, Shiraz, – 2005. – p. 20–28.

51. Zaytsev Valeriy. For designing of cylindrical cargo tanks of liquefied-gas carriers / Valeriy Zaytsev // Ninth international conference on marine sciences and technologies: "Black sea 2008". Varna, Bulgaria: – Varna: Technical university, 2008. – p 102–104.

52. Kryzhanivskyy Ye. The concept of fast alternative delivery natural gas to Ukraine // Ye Kryzhanivskyy, Val. Zaytsev // The 5th International Symposium on hydrocarbons & Chemistry (ISHC5), Sidi Fredj, Algiers. May the 23 to 25, 2010. – p. 127.

АНОТАЦІЯ

Зайцев В. В. Наукові основи ефективного транспортування стиснутого природного газу морськими акваторіями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013.

Дисертація присвячена вирішенню важливої народногосподарської проблеми – швидкому альтернативному постачанню природного газу до України.

Мета дослідження – розробка наукових основ ефективного транспортування стиснутого природного газу морськими акваторіями за допомогою спеціальних суден-газовозів, суден-контейнеровозів та барж.

У дисертаційній роботі вперше розроблено концепцію транспортування стиснутого природного газу за допомогою спеціалізованих контейнеровозів, рухомих трубопроводів на баржах, на судах на повітряній подушці і за допомогою підводного носія рухомого трубопроводу. Вперше розроблено комплексні основи проектування і розрахунків елементів CNG-модулів. Доведено, що для CNG-газовозів доцільно використовувати балони, виготовлені з полімерних матеріалів, що збільшує частку маси газу в загальній масі балона у порівнянні з металевими балонами.

Ключові слова: рухомий трубопровід, стиснутий природний газ, CNG-модуль, контейнеровоз, концепція, морське транспортування.

АННОТАЦИЯ

Зайцев В. В. Научные основы эффективной транспортировки сжатого природного газа морскими акваториями. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2013.

Диссертация посвящена решению важной народнохозяйственной проблемы – быстрого альтернативного снабжения Украины природным газом.

Цель исследования – разработка научных основ эффективной транспортировки сжатого природного газа морскими акваториями с помощью специальных судов-газовозов, судов-контейнеровозов и барж.

Методы исследования приняты аналитические и численные. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 500...700 млн. дол. США.

Установлено, что на сегодня отсутствуют результаты теоретических исследований о транспортировке сжатого природного газа с помощью подвижных трубопроводов на судах-носителях, публикации по определению технико-экономических показателей подвижных трубопроводов, расчетные эксперименты, позволяющие выявлять особенности процесса нагружения подвижного трубопровода внутренним давлением от транспортируемого сжатого газа. Отсутствуют на

сегодня как теоретические, так и экспериментальные работы, которые бы позволили исследовать НДС подвижных трубопроводов и их элементов.

Исследованы такие задачи: проведение анализа методов транспортировки природного газа морскими акваториями; разработка теоретико-методологических принципов формирования технологий транспортировки сжатого природного газа через морские акватории и концептуальных решений такой транспортировки судами-контейнеровозами, баржами и носителями на воздушной подушке; разработка основ расчетов и проектирования элементов подвижных трубопроводов для транспортировки сжатого газа; разработка основ расчетов и проектирования CNG-модулей с баллонами высокого давления и исследование их массогабаритных характеристик; разработка принципов размещения модулей на судах и их объединения в подвижный трубопровод; разработка основ расчетов и проектирования судов-носителей подвижных трубопроводов, их устройств и систем; проведение экономической оценки системы морской транспортировки сжатого природного газа с использованием контейнеровозов и барж.

В диссертационной работе впервые разработана концепция транспортировки сжатого природного газа с помощью специализированных контейнеровозов, подвижных трубопроводов на барже, на СВП и с помощью подводного носителя подвижного трубопровода. Впервые разработаны комплексные основы проектирования и расчетов элементов CNG-модулей, в том числе коническо-цилиндрических и коническо-сферических. Доказано, что для CNG-газовозов целесообразно использовать баллоны, изготовленные из композиционных полимерных материалов, что увеличивает долю массы природного газа в общей массе баллона с газом по сравнению с металлическими баллонами.

Практическое значение исследований определяется тем, что математические модели, методы расчетов и проектирования подвижных трубопроводов, полученные в работе результаты, могут быть использованы не только для контейнеровозов, барж, но и для других типов носителей подвижных трубопроводов. Использование полученных в работе результатов исследований, а именно, методов расчетов прочности элементов подвижных трубопроводов, методов для анализа процесса транспортировки CNG с помощью подвижного трубопровода, НДС элементов подвижного трубопровода с помощью МКЭ дают возможность инженерам, конструкторам, проектировщикам и студентам проводить анализы прочности подвижных трубопроводов, а также выявлять и использовать их резервы прочности, конструировать и строить подвижные трубопроводы на основе достоверных и современных методов. Приведены практические рекомендации по проектированию и эксплуатации подвижных трубопроводов и их носителей и элементов.

Достоверность результатов исследований подтверждена корректным применением соответствующих методов научных исследований, к которым относятся: теория тонких оболочек, теория мягких оболочек и метод конечных элементов, соответствием результатов расчетов проведенных с помощью аналитических методик результатам, полученными с помощью МКЭ.

Ключевые слова: подвижный трубопровод, сжатый природный газ, CNG-модуль, контейнеровоз, концепция, морская транспортировка.

ANNOTATION

Zaytsev V.V. The scientific basis for effective transportation of compressed natural gas through marine areas. – Manuscript.

Dissertation for Doctor's Degree of Science (Engineering) in specialty 05.15.13 – pipeline transportation, oil and gas storages. – Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, 2013.

Dissertation is dedicated to important National Economy problem – rapid alternative natural gas supply of Ukraine.

The purpose of research – development of scientific bases for effective transportation of compressed natural gas through marine areas with the help of special gas carriers, container ships and barges.

In dissertational work first time developed the concept of transporting CNG by container ships, movable pipelines on a barges, on hovercrafts and using underwater carrier of movable pipeline. The first time developed the foundations of design and analysis of elements of CNG-modules. It is proved that for CNG-gas carriers advisable to use cylinders made from polymer materials, which increases the proportion of the mass of gas to the total weight of cylinder as compared to metal cylinders.

Keywords: movable pipeline, compressed natural gas, CNG-module, container ship, concept, maritime transportation.