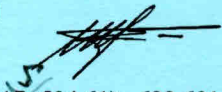


502.175  
М23

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ**  
**УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

**Мандрик Олег Миколайович**

  
УДК (502.17+504.61) : 622.691,4(4+43)

М23 622.691,4(043)

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ**  
**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ**  
**ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

21.06.01 – екологічна безпека

**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-кор. НАН України  
**КРИЖАНІВСЬКИЙ Євстахій Іванович**,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу Міністерства освіти і науки України, ректор.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**ЯКОВЛЄВ Євген Олександрович**,  
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,  
головний науковий співробітник;

доктор технічних наук, професор  
**ВОЛОШКІНА Олена Семенівна**,  
Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України,  
декан санітарно-технічного факультету;

доктор технічних наук  
**БАНАХЕВИЧ Юрій Володимирович**,  
ПАТ "УКРТРАНСГАЗ",  
начальник відділу по експлуатації магістральних газопроводів і газорозподільних станцій.

Захист відбудеться **“31” жовтня 2013 р. о 10 год. 30 хв.** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий **“27”** вересня 2013 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05

Хомин В.Р.

## ГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Газотранспортна система (ГТС) України - одна з найбільших у світі – виконує дві основні функції: забезпечення природним газом внутрішніх споживачів, а також транзит природного газу територією України в країни Західної та Центральної Європи.

ГТС України складається з 38,55 тис. км газопроводів з компресорними станціями, 13 підземних сховищ газу, мережі газорозподільних і газовимірювальних станцій. Магістральні трубопроводи є найбільш капіталосними елементами газового комплексу держави. Оскільки вартість нового газопроводу на порядок вища від раніше побудованого, то економічно доцільно, спираючись на дані технічного та екологічного моніторингу, максимально продовжити технологічну та екологічно-безпечну експлуатацію газопровідних систем.

У зв'язку зі старінням газотранспортної мережі та недосконалістю державного контролю за її безпекою, в останні роки спостерігається збільшення кількості аварій на газопроводах України (розрив труб через просідання ґрунту; утворення корозійних тріщин; деформація трубопроводів, спричинена зсувами і повсями; електродікорозія на ділянках підтоплення та ін.). Також зростає вплив на ГТС факторів глобальної зміни клімату: потепління, збільшення кількості та нерівномірності опадів, частота повеней та ін.

Основні причини відмов магістральних газопроводів висвітлено у роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених, зокрема: П.П. Бородавкіна, В.Я. Грудза, О.М. Іванцова, В.М. Івасіва, О.М. Карпаша, В.А. Котляревського, А.Я. Красовського, С.І. Крижанівського, І.І. Мазура, Г.М. Никифорчина, О.Т. Цирульника, С.Г. Полякова, В.С. Сафонова, Л. Тота, В.В. Харіоновського, Л.С. Шлапака та інших.

Внаслідок експлуатації більше 25 років значної частини газопроводів України зростає ризик виникнення аварійно-небезпечних дефектів та можливість їх руйнування. Це спричиняє надходження до атмосферного повітря, ґрунту та водойм складових природного газу. Накопичення цих речовин в атмосфері є причиною порушення газового балансу, що може активізувати глобальну зміну клімату. Особливо небезпечними є сірчисті сполуки й окиси азоту, які спричиняють кислотні дощі, що можуть випадати на відстані багатьох сотень і тисяч кілометрів від джерела первісного викиду речовин. Під впливом кислотних дощів відбувається закислення вод озер і ґрунтів, змінюється їх хімічний склад, погіршується водно-екологічний стан тощо.

На сьогодні багато вітчизняних та зарубіжних вчених, зокрема: О.М. Адаменко, Р.М. Говдяк, І.І. Мазур, М.С. Мальований, Г.І. Рудько, Я.М. Семчук, А.М. Хофф, Л.С. Шкіца, С.О. Яковлев та інші довели негативний вплив трубопроводного транспорту на навколишнє середовище. У процесі вишукування трас, будівництва й експлуатації трубопроводів відбувається вплив на навколишнє

середовище, рослинний і тваринний світ, підземні й поверхневі води, а також приземний шар атмосфери.

Продовження терміну служби та забезпечення надійної роботоздатності газопроводів, які експлуатуються в сучасних умовах, вимагає розробки комплексної методології оцінювання та прогнозування їх безпечної експлуатації.

Тому важливими першочерговими завданнями в галузі підвищення еколого-техногенної безпеки газотранспортного комплексу України є:

- удосконалення системи екологічного моніторингу за об'єктами комплексу (від родовищ і трубопроводів до сховищ та об'єктів використання газу) на основі спостережень за змінами хімічного складу атмосфери та ґрунту, їх спектрально-фізичних параметрів та ін.;

- розроблення методології оцінювання впливу розмірів руйнування магістральних газопроводів та величини втраг витоків на формування арсалів забруднення;

- розроблення наукових основ та організація постійного екологічного аудиту на об'єктах газотранспортної інфраструктури.

Негативний вплив на навколишнє середовище при транспортуванні природного газу просторово розвинутою ГТС має високий ризик виникнення. Швидкий розвиток газової галузі та зростаюча залежність промисловості від газу створюють нові екологічні проблеми. Основні завдання полягають не тільки в тому, щоб звести до мінімуму негативний техногенний вплив на безпеку життєдіяльності та навколишнє середовище, але й змінити саму стратегію безпечного розвитку паливо-енергетичного комплексу. Перспективним стратегічним напрямом покращення забезпечення України природним газом є розроблення і впровадження екологічно безпечних та економічно вигідних CNG-технологій транспортування природного газу.

У зв'язку з цим у дисертаційній роботі вирішується актуальна науково-технічна проблема загальногосподарського значення щодо підвищення рівня еколого-техногенної безпеки при транспортуванні природного газу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась згідно з науково-технічними програмами та планами Міністерства освіти і науки України в науково-дослідному інституті нафтогазових технологій та екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) та є невід'ємною складовою наукового напрямку інженерно-екологічного факультету ІФНТУНГ й безпосередньо пов'язана з науковою темою «Екологічна безпека і землевпорядне забезпечення територіально-адміністративних одиниць та експлуатаційна надійність промислових об'єктів» (номер державної реєстрації – 0110U000339), а також з тематикою держбюджетних науково-дослідних робіт:

- тема №ОБ-07/2009 “Розроблення цільової екологічної програми „Програма охорони навколишнього природного середовища в межах нафтогазових

промислів Богородчанського району на 2010 – 2015 роки” (номер державної реєстрації 0109U008154) науковий керівник;

- тема №ОБ–05/2010 „Розробка „Обласної програми охорони навколишнього природного середовища до 2015 року” (номер державної реєстрації – 0110U008157) провідний науковий співробітник;
- держбюджетна тема № Д–19–13–П „Розроблення та оптимізація технологій і засобів транспортування газу для підвищення енергетичної безпеки держави” (номер державної реєстрації – 0113U001101) – провідний науковий співробітник;
- науково-дослідна робота Ф47/069 „Удосконалення методів зменшення техногенного забруднення навколишнього середовища нафтогазових комплексів” (номер державної реєстрації – 0112U006827) – провідний науковий співробітник;
- міжнародний проєкт HUSKROUA/1001/110 „Управління забрудненими нафтопродуктами ділянками”, що фінансується Європейською комісією в рамках Програми співробітництва Угорщина - Словаччина Румунія – Україна на 2007-2013 роки (EMPI CBC) – асистент проєкту.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня еколого-техногенної безпеки при транспортуванні природного газу шляхом розроблення ефективних методів оцінки негативного впливу газотранспортної інфраструктури на навколишнє середовище та заходів його зменшення.

Досягнення поставленої мети вимагало розв’язання таких завдань:

- одержати комплекс нових експериментальних даних про характеристики міцності та тріщиностійкості трубопровідних сталей магістральних газопроводів тривалої експлуатації та розробити нові методологічні підходи, які б забезпечили удосконалення досліджень умов, за яких потенційно можливе виникнення процесів неконтрольованого в’язкого та крихкого (лавинного) руйнування газопровідних систем;
- розробити конструкцію і технологію виготовлення легких та надійних в експлуатації зварних балонів, в яких для зменшення їх маси використовуються високоміцні сталі та композиційні матеріали, що дозволить збільшити об’єм транспортованого газу та підвищити еколого-техногенну безпеку експлуатації газозовів як на суші, так і на морі;
- розробити методологію оцінювання умов руйнування лінійної частини трубопроводу із довільно розміщеними наскрізними тріщинами та встановити критеріальні залежності, які дозволяють оцінити розміри порогових (утворення свища) та критичних (лавинне руйнування труби) наскрізних тріщин у стінках труб магістральних газопроводів тривалої експлуатації, що дасть змогу прогнозувати зони розлітання фрагментів газопровідної труби під час вибуху, оцінити екологічну небезпеку та нанесені збитки;
- розробити методологію та встановити критеріальні залежності оцінювання умов руйнування лінійної частини трубопроводу із зовнішніми, довільно орієнтованими ненаскрізними тріщиноподібними дефектами заданої глибини, що дасть можливість здійснювати прогнозу оцінку та інтерпретацію виявлених під

час діагностування дефектів, а також слугуватиме запобіганню ризику виникнення аварійних ситуацій на магістральних газопроводах;

- розробити та обґрунтувати основні вимоги з безпеки транспортування стисненого природного газу морськими шляхами за CNG-технологією;
- розробити та обґрунтувати метод витіснення повітря в рухомому трубопроводі інертним газом (азотом), який би забезпечував пожежо- і вибухобезпеку завантаження рухомого трубопроводу при введенні його в експлуатацію;
- розробити методологію оцінювання впливу розмірів руйнування магістрального газопроводу на величину витoku газу і на формування арсалу забруднення;
- здійснити прогнозу оцінку впливу зони детонації і дальності розповсюдження хмари вибухонебезпечної суміші під час аварій та розробити рекомендації щодо зниження ризику виникнення небезпечних ситуацій;
- розробити технологічні рекомендації та впровадити результати досліджень в УМГ „ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ”, ІФНТУНГ, Державній екологічній інспекції, Державному управлінні охорони навколишнього середовища в Івано-Франківській області.

**Об’єкт дослідження** – процес формування та зміни еколого-техногенного стану навколишнього середовища в зоні впливу газотранспортної інфраструктури.

**Предмет дослідження** – наукове обґрунтування оцінки впливу газотранспортної інфраструктури на навколишнє середовище та його зменшення.

**Методи дослідження.** Методологічною основою роботи є сумісне використання фізичного, математичного і комп’ютерного моделювання об’єкта досліджень та експериментальних методів (у тому числі моніторингу ГТС) для підтвердження адекватності отриманих результатів на діючому обладнанні та лабораторних установках. Зокрема:

- системного аналізу - при виборі загальної методології дисертаційного дослідження;
- метод скінчених елементів – при розробленні наукових основ розрахунку та проектування смностей високого тиску рухомих трубопроводів і при вивченні їх напружено-деформованого стану (НДС);
- експериментальними методами механіки руйнування вивчались характеристики міцності та тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів тривалої експлуатації;
- методами фізичного, математичного і комп’ютерного моделювання виконано оцінювання впливу розмірів руйнування магістрального газопроводу і величини втрат витoku на формування арсалу забруднення та здійснено прогнозу оцінку впливу зони детонації і дальності розповсюдження хмари вибухонебезпечної суміші під час аварій на магістральних газопроводах.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше запропоновано методологічні підходи та досліджено умови, за яких потенційно можливе виникнення процесів неконтрольованого в'язкого та крихкого (лавинного) руйнування газопровідних систем.

2. Вперше для оцінювання процесу формування ареалу забруднення ґрунто-породного комплексу витокami природного газу із підземних газопроводів розроблено і обґрунтовано математичну модель, яка дає змогу встановити залежність параметрів формування ареалу забруднення від величини витрати витоку та підвищити екологічну безпеку експлуатації магістральних газопроводів.

3. Удосконалено методологію та розроблено модельні схеми і критерії оцінювання умов руйнування лінійної частини газопроводу із зовнішніми, довільно розміщеними наскрізними тріщинами та ненаскрізними тріщиноподібними дефектами заданої глибини, що дає змогу підвищити техногенну та екологічну безпеку магістральних газопроводів з тривалим терміном експлуатації.

4. Розроблено та обґрунтовано математичну модель для розрахунку параметрів CNG-модуля з довгомірною трубою високого тиску (рухомого трубопроводу) для екологічно безпечного транспортування стисненого природного газу морськими шляхами.

5. Удосконалено модель розрахунку параметрів продування рухомого трубопроводу інертним газом перед уведенням його в експлуатацію для забезпечення техногенної та екологічної безпеки шляхом усунення умов виникнення вибуху.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Спроектовано, виготовлено та проведено апробацію нового двадцятиканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) для визначення напружено-деформованого стану великогабаритного обладнання, насамперед, трубопроводів великих діаметрів.

Одержано комплекс нових експериментальних даних про характеристики міцності та тріщиностійкості трубопровідних сталей магістральних газопроводів тривалої експлуатації на прикладі Богородчанського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів (ЛВУМГ), що дає змогу підвищити еколого-техногенну безпеку його експлуатації.

Розроблено нову технологію продування рухомого трубопроводу інертним газом перед уведенням його в експлуатацію для забезпечення техногенної та екологічної безпеки.

Розроблено методику оцінювання впливу розмірів руйнування магістрального газопроводу і, як наслідок, величини витрат витоку газу на формування ареалу забруднення приземної атмосфери та здійсненні прогнозних оцінок впливу зони детонації і дальності розповсюдження хмари вибухонебезпечної суміші під час моделювання аварій на магістральному газопроводі. Зокрема, здійснено

прогнозу оцінку впливу зони детонації і дальності розповсюдження хмари вибухонебезпечної суміші при моделюванні аварійних ситуацій на магістральних газопроводах Богородчанського газотранспортного вузла й розроблено рекомендації щодо зниження ризику їх виникнення, що дасть змогу зменшити наслідки негативного впливу на безпеку життєдіяльності, навколишнє середовище та інфраструктуру.

На основі запропонованої математичної моделі розроблено методологію оцінювання процесу формування ареалу забруднення ґрунту витокami із магістрального газопроводу та розроблено програмне забезпечення для розрахунків еколого-економічних збитків при моделюванні аварійних ситуацій.

Розроблено та обґрунтовано конструкцію CNG-модуля з довгомірною трубою високого тиску (рухомого трубопроводу) для екологічно безпечного транспортування стисненого природного газу морськими шляхами.

Одержані у дисертаційній роботі результати та рекомендації впроваджено в УМГ „ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ”, Державній екологічній інспекції, Державному управлінні охорони навколишнього середовища в Івано-Франківській області, які підтвердили основні положення роботи, а також в навчальний процес ІФНТУНГ щодо підготовки бакалаврів за напрямом „Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування” під час вивчення дисципліни „Екологічна безпека”, спеціалістів – дисципліни „Оцінка впливу на навколишнє середовище об’єктів народного господарства” та магістрів – дисципліни „Глобальні проблеми екології”.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формуванні ідеї, мети і завдань досліджень, розробленні: теоретичних положень методології еколого-техногенної безпеки транспортування газу, модельних схем і критеріїв оцінювання умов руйнування лінійної частини газопроводу, CNG-модуля з довгомірною трубою високого тиску для безпечного транспортування стисненого природного газу.

Наукові, методичні та практичні висновки і положення, винесені на захист, є авторськими. Дисертація є самостійною науковою завершеною працею, яка містить отримані автором результати щодо постановки та вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення рівня еколого-техногенної безпеки транспортування газу. Особисто автору належать розроблені концептуальні та методологічні підходи, ним сформульовано наукові положення, висновки та рекомендації. З наукових результатів, опублікованих у співавторстві, дисертантом використано лише ті, на які розповсюджуються права його інтелектуальної власності.

Обговорення, аналіз та узагальнення результатів досліджень проведені з науковим консультантом д.т.н., професором, член-кор. НАН України С.І. Крижанівським.



**Апробація результатів дисертації** полягає у їхньому оприлюдненні, обговоренні та схваленні на міжнародних і всеукраїнських конференціях, семінарах, з'їздах, а саме: Міжнародній науково-практичній конференції „Карпатська конвенція з проблем охорони довкілля” (м. Мукачеве – м. Ужгород, 15-18 травня 2011 р.); Міжнародній науково-технічній конференції „Нафтогазова енергетика – 2011” (м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції „Безпека об'єктів нафтогазового комплексу” (м. Івано-Франківськ, 5-7 жовтня 2011 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції „Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування” (м. Івано-Франківськ, 20-22 вересня 2012 р.); 2nd International Conference „Alpine-Petrol 2012” on „Geology, Ecology and Petroleum Perspectives of the Carpathians and other Alpine regions in Europe” (Krakow – Poland, 25th-28th September, 2012); IV-VII науково-практичних конференціях „Сучасні проблеми збалансованого природокористування” (м. Кам'янець-Подільський, листопад 2009-2012 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції „Проблеми екологічної безпеки” (м. Кременчук, 3-5 жовтня 2012 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції „Еколого-правові та економічні аспекти екологічної безпеки регіонів” (м. Харків, 17-19 жовтня 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Наука і техніка: виклики сьогодення» (м. Київ, 08-09 лютого 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції „Problems and perspectives of development of world science” (м. Донецьк, 15-17 лютого 2013 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції „Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування” (м. Луцьк, 3-7 червня 2013 р.), науково-технічних та практичних конференціях професорсько-викладацького складу та науковців ІФНТУНГ.

У повному обсязі робота доповідалась на розширеному науково-технічному семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2013).

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження опубліковано в 35 наукових працях, в тому числі одній монографії обсягом 23,1 друк. аркушів, двох патентах, 21 статті у наукових фахових виданнях, 11 матеріалах та тезах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел (301 найменування) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 345 сторінок. Робота містить 98 рисунків та 33 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи, завдання та методи досліджень, висвітлено наукову новизну, теоретичні та методологічні розробки і практичне значення отриманих результатів, а також наведено відомості щодо переліку місць апробації роботи, її структури та обсягу публікацій.

У першому розділі „Постановка проблеми та аналіз її сучасного стану. Мега та завдання роботи” досліджено сучасний стан проблеми підвищення рівня еколого-техногенної безпеки при транспортуванні природного газу.

Природний газ на цей час є найбільш поширеним та екологічно досить безпечним енергоносієм. Його прогностичні запаси, енергетичні та екологічні характеристики забезпечать йому домінування в паливно-енергетичному комплексі впродовж щонайменше одного століття. Застосований як пальне у двигунах внутрішнього згоряння, що є одними з найбільших забруднювачів довкілля, він порівняно з іншими видами пального утворює в 5-10 разів менше окису вуглецю, в 3 рази ароматичних вуглеводнів, у 1,5-2,5 рази оксидів азоту.

Виходячи з аналізу літературних джерел, присвячених оцінюванню аварійних ситуацій на магістральних газопроводах, що мали місце в процесі їх експлуатації, аналізу екологічних та економічних наслідків при транспортуванні природного газу наземними та підводними газопроводами, сформульовано мету дисертаційної роботи та основні завдання для її досягнення.

У другому розділі „Методологія досліджень та її обґрунтування” наведено методики та засоби експериментальних досліджень екологічної та техногенної безпеки при транспортуванні природного газу.

Спроектовано, виготовлено та проведено апробацію нового двадцятиканального аналого-цифрового перетворювача – пристрою для визначення напружено-деформованого стану трубопроводів великих діаметрів. На цій основі розроблено методичну процедуру визначення характеристик напружено-деформованого стану в зоні основного металу і кільцевих зварних з'єднань труб магістральних газопроводів, де можлива концентрація напружень і підвищений ризик руйнування.

Адаптовано методику розрахунку руйнівного тиску до визначення умов виникнення в'язкого руйнування газопровідних труб тривалої експлуатації, що містять ненаскрізні зовнішні довільно орієнтовані тріщини або корозійно-механічні тріщиноподібні дефекти, розміщені на зовнішніх поверхнях труб.

Модифіковано методику та експериментальні засоби визначення характеристик статичної тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів тривалої експлуатації.

Розроблено методичну процедуру визначення характеристик статичної тріщиностійкості металу магістральних газопроводів із урахуванням тривалої дії експлуатаційних чинників: режимів навантаження, впливу середовища, деградації міцнісних властивостей матеріалу внаслідок тривалої роботи.

Експериментально встановлено закономірності характеристик міцності та тріщиностійкості трубопровідних сталей магістральних газопроводів тривалої експлуатації Богородчанського газотранспортного вузла.

Поєднання розроблених нових теоретичних положень і методичних підходів та діючого випробувального обладнання (навчально-наукова лабораторія „Механіка руйнування матеріалів та міцність елементів конструкцій у експлуатаційних середовищах”) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу дало змогу провести дослідження умов, за яких потенційно можливе виникнення процесів неконтрольованого в'язкого та крихкого (лавинного) руйнування газопровідних систем.

Також у розділі наведено методику розрахунку екологічної складової збитків від можливих аварій та відмов обладнання магістральних газопроводів.

**У третьому розділі „Транспортування стисненого природного газу в замкнутих ємностях”** наведено результати аналітичних і експериментальних досліджень щодо розроблення екологічно безпечної технології зберігання і транспортування морськими шляхами стисненого природного газу в замкнутих ємностях.

Як відомо, балони високого тиску є досить надійним засобом для завантаження та зберігання природного газу під тиском. Ще в 1960-х роках ХХ століття в США була здійснена спроба реалізувати ідею транспортування газу в такому стані через Атлантичний океан, використовуючи безшовні суцільнометалеві балони. Проте спроба виявилась невдалою через надмірну вагу балонів великої місткості, що обмежувало дедвейт корабля-газовоза. Тому об'єм витраченого за енергетичними показниками пального перевершував доставлений ресурс.

Зараз ситуація змінилась. Набутий досвід будівництва і експлуатації газопроводів із зварних труб великих діаметрів, новітні розробки в галузі комбінованих конструкцій, а також досягнення в справі газифікації автотранспорту створюють необхідні умови для успішного вирішення цієї проблеми. Більш того, за даними фірми Knutsen O.A.S. Shipping, транспортування стисненого природного газу (англ., Compressed natural gas, CNG) морем на відстані 500-3000 мор. миль економічно доцільно.

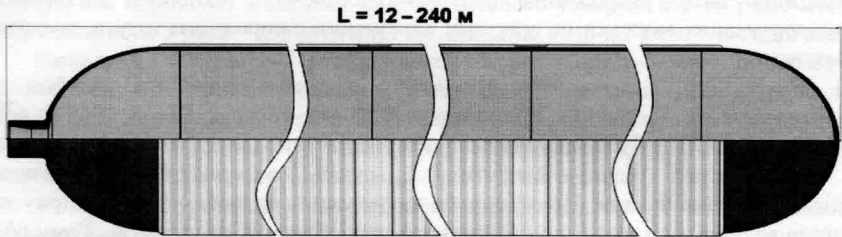
Транспортування CNG-газовозами має ще й інші переваги:

- диверсифікація джерел і пунктів отримання газу; можливість використання незадіяних офшорних платформ для розвантаження; відносно менша вартість інфраструктури для завантаження або розвантаження;
- простота конструкції системи завантаження;
- вищий рівень безпеки, а тому допускається можливість зменшення коефіцієнта запасу міцності балонів;
- можливість використання незадіяних контейнеровозів шляхом їх переобладнання;

- екологічно чиста технологія завантаження/розвантаження;
- використання технологій виробництва труб і спорудження газопроводів високого тиску (до 25 МПа) для створення балонів великого об'єму і тиску.

Одним із основних показників балонів для транспортування газу морським шляхом є їх масогабаритний показник ( $M/V$ ), тобто відношення маси балону до його корисного об'єму. За даними компанії „Интари” (Росія) виготовлений із високоміцної трубної сталі Х80 балон має цей показник на рівні 1,7. Оснащене такими балонами судно місткістю 80 тис. тон зможе перевезти за один рейс до 12 млн  $m^3$  газу. Це вважається добрим показником для компанії, яка видобуває і постачає газ своїми засобами, тому що навіть при ціні 135 \$ за 1000  $m^3$  газу рентабельність її перевезень складатиме більше 10%.

Наші розрахунки доводять, що вказаний показник можна значно покращити, застосувавши комбіновані балони – сталевий лейнер з оболонкою із композиційного матеріалу (рис. 1).



**Рис. 1. Комбінований балон – сталевий лейнер з оболонкою із композиційного матеріалу**

Композиційний матеріал, сформований із скловолокна на епоксидній основі, дозволяє покращити співвідношення  $M/V$  в 2,1-2,5 рази та підвищити місткість системи завантаження в 1,5-2 рази (залежно від міцності сталі). Великою перевагою композиційної оболонки є її надійність. Результати випробувань підтвердили, що утворення втомної тріщини не викликає руйнування балону. Тріщина утворюється тільки в сталевому корпусі балону, що призводить до спаду тиску і подальшого закриття тріщини. Тобто газ не повністю викидається в атмосферу, а та частка, що вийшла з балону, просочується крізь композиційний матеріал оболонки, не руйнуючи її.

Для виготовлення сталевого лейнера вибрано сталь 30ХГСА міцністю від 600 до 1600 МПа. З метою дослідження впливу температури відпуску на пластичні властивості проведено експериментальні випробування основного металу за температур відпуску 500, 550 та 600°C. Результати випробувань свідчать, що для отримання величини відносного видовження  $\delta$  не менше 14 %, що вимагається нормативними документами на зварну конструкцію, температура відпуску сталі 30ХГСА повинна бути не нижчою 550°C.

На моделях балонів  $D_{\text{вн}} = 229$  мм,  $L = 860$  мм попередньо було встановлено, що при напруженнях 950 МПа та відносному видовженні  $\delta \geq 14\%$  забезпечується необхідна довговічність зварних балонів при  $N \geq 15000$  циклів навантажень. Причому, як показали випробування балонів внутрішнім тиском, після 15000 циклів "заправка-випуск" їх запас міцності не зменшується. Тобто у вказаному діапазоні циклів забезпечується високий опір втомному руйнуванню.

В основу технології виготовлення композиційної оболонки покладені технологічні принципи, розроблені при виготовленні дослідних кільцевих зразків, оцінка якості яких підтверджена лабораторними дослідженнями фізико-механічних і технологічних властивостей композиційних матеріалів.

Методика розрахунків міцності та довговічності комбінованих балонів, що працюють під тиском, випробовувалась на їх моделях.

Основним завданням розрахунку було визначення на стадії проєктування оптимального міцнісного співвідношення між товщиною стінки металевого корпусу та композиційної оболонки, які забезпечать надійну експлуатацію балонів із заданими запасом міцності та довговічністю при циклічних навантаженнях. Результати розрахунків покладені в основу вибору оптимальних значень товщини металу та композиційної оболонки при виготовленні дослідної партії балонів, а також перевірені при теоретичному обґрунтуванні балонів великої місткості.

Існує два види напруженого стану в металопластиковому балоні, циліндрична частина металевого корпусу якого підсилена композиційним матеріалом, сформованим кільцевою намоткою стрічки склоровінгу із попереднім натягом. Перший стан характеризується початковими напруженнями стискання, які виникають у металевому корпусі в результаті намотування стрічки склоровінгу з попереднім напруженням. Другий стан виникає після прикладання до попередньо напруженого балону внутрішнього тиску.

Шляхом розрахунків напружено-деформованого стану (НДС) балону визначено товщину композиційної оболонки та величину попереднього натягу технологічної стрічки склоровінгу для забезпечення необхідного запасу міцності з метою попередження руйнування металу та композиційного матеріалу.

Результати розрахунків свідчать, що з досягненням внутрішнього тиску 58,0 МПа параметри міцності склопластику та металу вичерпуються одночасно, тобто комбінована конструкція рівномісна при розрахунковій товщині сталевго корпусу  $h_{op} = 3,15$  мм та склопластикової оболонки  $h_p = 2,8$  мм.

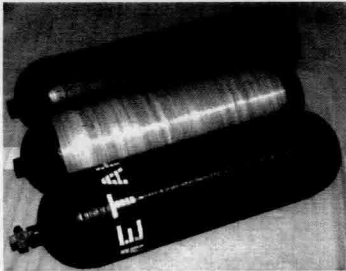
Проведено також розрахунок конструктивних елементів балону (циліндричної частини та напівсферичних днищ) на циклічну довговічність. Встановлено, що умови міцності при циклічних навантаженнях металопластикового балону на встановлений термін експлуатації 15 років виконані.

Елементи корпусів балонів виготовляли із листових високоміцних сталей 30ХГСА та 25ХСНМФА вальцюванням циліндричної обичайки та шгампуванням напівсферичних днищ.

Дослідну партію корпусів товщиною 3,5 мм і зовнішнім діаметром 212 мм виготовляли зі сталі 30ХГСА, а зовнішнім діаметром 236 мм – зі сталі 25ХСНМФА, що забезпечувало розрахунковий запас міцності циліндричної частини на рівні близько 1,6, а напівсферичних днищ – 3,2.

Це дозволяє не покривати напівсферичні днища композиційним матеріалом, тому що запас їх міцності більший від встановлених вимогами –  $k = 2,6$ , а підсилювати тільки циліндричну частину балону, що забезпечує зниження маси балону і одночасно зменшує трудомісткість його виготовлення. Для досягнення рівномірного запасу міцності готового балону використовувалось підсилення циліндричної частини корпусів однонаправленим кільцевим композиційним матеріалом на основі ровінгу ЕС10 1618-У10(168) та зв'язуючої КДА-ХІ. Відпрацьовані технологічні режими на дослідних кільцевих зразках дозволили довести міцність композиційного матеріалу в кільцевому напрямку до 950 МПа, тобто забезпечити його рівноміцність зі сталлю.

Для проведення повного комплексу досліджень працездатності та довговічності металопластикових балонів в умовах багаторазових навантажень під час їх заправки в ході експлуатації та можливих екстремальних ситуацій була виготовлена дослідна партія балонів (рис. 2).



**Рис. 2. Дослідні зразки зварних металопластикових балонів, підсиленних композиційним матеріалом**

Зразки металопластикових балонів пройшли повний об'єм лабораторних та полігонних випробувань, які відтворювали умови їх експлуатації, з урахуванням вимог вітчизняних та зарубіжних стандартів до виробів такого типу.

Величина фактичного коефіцієнту запасу міцності балонів визначалась на установці для гідравлічних випробувань шляхом плавного підвищення внутрішнього гідравлічного тиску до зруйнування корпусу балона.

Для встановлення запасу міцності сталевому корпусу балона, були проведені експериментальні випробування без підсилення композитом. Корпуси руйнувалися в'язко без утворення осколків, причому наявність зварних швів не вплинула на характер та місце руйнування.

Руйнування балонів із сталевим корпусом відбувалось за тиску від 31,0 до 32,0 МПа. Це підтвердило правильність вибраних режимів термообробки металу, а також розрахунку величини товщини сталевому корпусу.

При підсиленні композиційним матеріалом товщиною 3,5 мм балони руйнувалися в інтервалі тисків від 58,0 до 61,0 МПа, що задовольняє поставленим вимогам та підтверджує результати теоретичних розрахунків.

В умовах малоциклових навантажень вимоги до зварних з'єднань зростають, тому в ході відпрацювання технології зварювання та режимів термічної обробки для визначення довговічності зварних корпусів були проведені їх випробування в режимі циклічних навантажень внутрішнім гідравлічним тиском, що змінювався в декількох діапазонах (2,0-5,0; 2,0-8,0 та 2,0-15,0 МПа) з частотою не більше 10 циклів/хв. Випробування здійснювалися до розгерметизації корпусів балонів.

В режимі циклічних навантажень розгерметизація зварних корпусів виникала у вигляді мікротріщин в біляшовній зоні термічного впливу на відстані 3-7 мм від межі сплавлення, які розкривалися під дією тиску та спричиняли витікання робочої рідини.

Для визначення можливого ресурсу експлуатації балонів проведено їх випробування в режимі циклічних навантажень внутрішнім гідравлічним тиском, що змінювався в діапазонах 2,0-20,0 та 2,0-22,0 МПа з частотою не більше 10 циклів/хв. Випробування здійснювались до розгерметизації балону.

В режимі циклічних навантажень розгерметизація балонів відбувалася у вигляді крапельного протікання, яке припинялося після зниження тиску до значення 5,0-15 МПа.

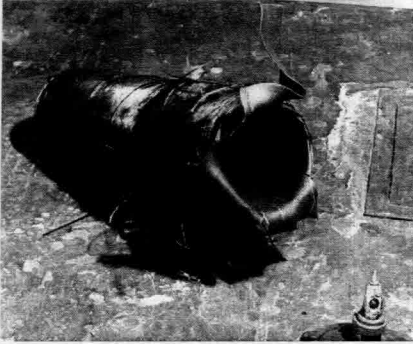
Залишковий коефіцієнт запасу міцності після проходження 15000 циклів навантаження визначався статичним навантаженням балону до руйнування та становив 2,75 (тиск руйнування 55,5 МПа).

Встановлено, що балони втрачають герметичність після досягнення не менше 15000 циклів навантажень. Це дає можливість експлуатувати їх впродовж щонайменше 15 років. Таким чином доведено, що зварні балони в разі підсилення композиційним матеріалом достатньо довговічні.

Комбіновані балони також є досить безпечними при динамічному навантаженні. Так, простріл бронебійними кулями калібру 7,62 або кумулятивними зарядами УКЗ-10 балонів, наповнених газом до тиску 19,6 МПа, призводить до пошкодження тільки однієї стінки, утворюючи отвір з рівними краями. При цьому газ виходить через отвір, не загоряючись і не вибухаючи. Прострілені ж суцільнометалеві балони руйнуються повністю.

Під час випробувань у вогні балони з газом під тиском 5 МПа, розташовані горизонтально над поверхнею дизельного пального, за 30 хв. нагріваються до температури 600-650°C. При цьому тиск в них підвищується до 18 МПа, що не викликає руйнування балонів. В балонах з початковим тиском газу 19,6 МПа, які розташовували вертикально у вогні, тиск зростав до 55 МПа. У результаті проведених випробувань металопластиковий балон руйнувався не раніше, ніж через 12 хв., розділяючись на дві частини без осколків, в той час, як суцільнометалеві балони руйнувалися через 20 хв., але з утворенням осколків.

Характер руйнування балонів з початковим тиском газу 19,6 МПа, які розташовували вертикально у вогні, наведено на рис. 3.



**Рис. 3. Характер руйнування балонів з початковим тиском газу 19,6 МПа, які розташовували вертикально у вогні**

Проведені кліматичні випробування балонів в інтервалі граничних температур від мінус 40 до плюс 60°C не вплинули на їх міцність та довговічність. Кидання балону на бетонну підлогу з висоти 1,8 м також не вплинуло на його міцність. Це підтверджує надійність та безпечність розробленої конструкції балона.

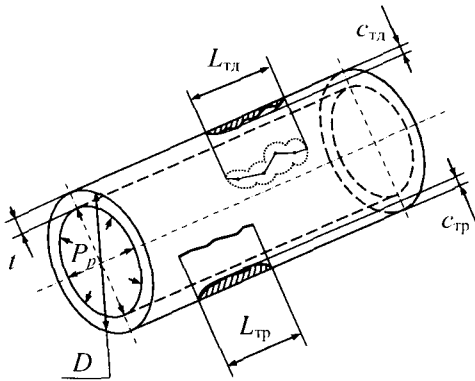
Відповідність вимогам вітчизняних і світових стандартів до зварних конструкцій балонів високого тиску досягнуто розробленням прогресивної технології зварювання з використанням спеціальних активуючих флюсів, режимів термічної та механічної обробки, що забезпечили рівномірність зварних з'єднань і основного металу, а довговічність – завдяки підсиленню зварних корпусів композиційними матеріалами. За рахунок комплексу нових розробок досягнуто підвищення працездатності балонів більше ніж в 20 разів та зменшення їх ваги в 2-3 рази. Балон має стабільний показник маси  $M/V = 0,65 \text{ кг/дм}^3$ .

Виконані дослідження дозволяють екстраполювати їх результати на широкий асортимент балонів різних геометричних розмірів за рахунок зміни їх діаметрів, довжини і товщини стінки без заміни основного технологічного обладнання. При цьому можна використовувати існуючі обладнання і матеріали, якими забезпечена промисловість України, а в подальшому розширити виробництво з випуском до кількох мільйонів балонів на рік, що дозволить створити сотні тисяч робочих місць у металургійній, хімічній та машинобудівній галузях промисловості та забезпечити надійність і безпеку при транспортуванні та використанні стисненого природного газу.

У четвертому розділі „Оцінювання умов потенційного руйнування газопроводів тривалої експлуатації” розглянуто умови, за яких потенційно можливий ризик крихкого або в'язкого руйнування газопроводів з дефектами. Слід зауважити, що, враховуючи специфіку (рис. 4) виявлених у газопроводах дефектів та умов експлуатації, руйнування газопровідних труб можливе за двома



сценаріями: в'язке руйнування після пружньопластичної деформації та крихке – шляхом відриву. Причому, обидва випадки руйнування газопровідних труб негативно впливають на навколишнє середовище, завдають значних економічних збитків та складають потенційну небезпеку для незахищених людей. Для оцінювання можливого виду руйнування газопровідної труби необхідно володіти інформацією про її напружено-деформований стан, яку одержують використовуючи тензометричний метод дослідження.



**Рис. 4.** Схематизація виявлених на зовнішній стороні газопровідної труби корозійно-механічного тріщиноподібного дефекту ( $L_{трл}$ ) та корозійно-втомної тріщини ( $L_{тр}$ )

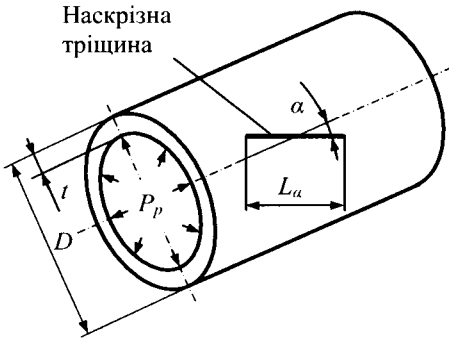
Параметри руйнування дефектної труби (руйнівний тиск  $P_r$ , критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{rc}$ ) залежать від умов експлуатації газопроводу (робочого тиску  $P_p$ ) та розмірів і орієнтації виявлених корозійно-механічних дефектів.

У роботі запропоновано методику оцінювання потенційного ризику крихкого руйнування газопроводів з дефектами у випадку, коли у стінці газопровідної труби наявна довільно орієнтована наскрізна тріщина (рис. 5). Для визначення критичних розмірів довільно орієнтованої тріщини враховували умову крихкого руйнування лінійної механіки руйнування конструкційних матеріалів  $K_r = K_{rc}$  та залежність для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  у вершині довільно орієнтованої наскрізної тріщини для труби, навантаженої внутрішнім тиском:

$$K_{Ia} = F_{Ia} \frac{P_p \cdot D}{2t} \sqrt{\frac{L_a}{2}}, \quad (1)$$

де  $F_{Ia}$  – відома функція для циліндричної оболонки з довільно розміщеною тріщиною під дією внутрішнього тиску,  $P_p$  – робочий тиск;  $D$  – зовнішній

діаметр труби;  $t$  - товщина стінки труби;  $L_\alpha$  - довжина довільно розміщеної наскрізної тріщини.



**Рис. 5. Розрахункова схема представлення довільно орієнтованої наскрізної тріщини у стінці газопровідної труби**

Відзначимо, що згідно з підходами механіки руйнування у випадку утворення в газопровідній трубі наскрізної тріщини можлива реалізація трьох сценаріїв її розвитку, які залежать від орієнтації та початкового розміру виявленого дефекту.

У першому випадку, коли розвиток фізично малої тріщини буде обумовлений вливом пульсуючого у трубі навантаження та ґрунтових вод, можливе утворення свища з розмірами наскрізної тріщини  $L_{mp}(\alpha) < L_{th}(\alpha)$ .

У випадку, коли розміри наскрізної тріщини будуть знаходитись у інтервалі  $L_{th}(\alpha) \leq L_{mp}(\alpha) < L_{fc}(\alpha)$ , швидкість розвитку корозійно-механічної тріщини визначатиметься діаграмою циклічної тріщиностійкості металу газопровідної труби.

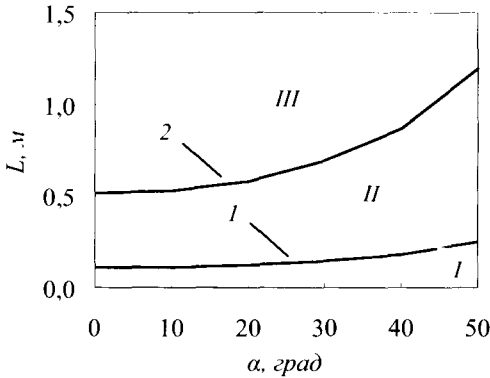
У третьому випадку - за умови  $L_{mp}(\alpha) \geq L_{fc}(\alpha)$  - відбуватиметься неконтрольований розвиток наскрізної тріщини у напрямку, паралельному до її осі, тобто матиме місце лавинне (катастрофічне) руйнування трубопроводу.

Враховуючи значення порогового ( $K_{th}$ ) та критичного ( $K_{fc}$ ) коефіцієнтів інтенсивності напружень, визначали розміри довільно орієнтованих порогових ( $L_{th}(\alpha)$ ) та критичних ( $L_{fc}(\alpha)$ ) наскрізних тріщин за формулами:

$$L_{th}(\alpha) = \left[ \frac{1}{F_\beta(\alpha)} \cdot \frac{2t}{D} \cdot \frac{K_{th}}{P_p} \right]^2, \quad (2)$$

$$L_{fc}(\alpha) = \left[ \frac{1}{F_\beta(\alpha)} \cdot \frac{2t}{D} \cdot \frac{K_{fc}}{P_p} \right]^2. \quad (3)$$

Встановлені критеріальні залежності (2) та (3) дозволяють оцінити розміри довільно орієнтованих порогових (крива 1, рис. 6) та критичних (крива 2, рис. 6) наскрізних тріщин магистрального газопроводу (820×10мм), що дає змогу прогнозувати ступінь екологічної небезпеки при їх утворенні, кількісну оцінку економічних збитків, а також зони, що утворилася при розлітанні фрагментів газопровідної труби та під час запалювання пожежно-вибухової вуглеводневої суміші.



**Рис. 6. Діаграма оцінки потенційної можливості (ризик) руйнування трубопроводів із зовнішнім діаметром  $D=820$  мм і товщиною стінки  $t_1=10$  мм з довільно орієнтованою наскрізною тріщиною**

Оцінку виникнення в'язкого руйнування, тобто визначення руйнівного тиску  $P_f$  трубопроводу тривалої експлуатації, що містить як зовнішні довільно орієнтовані тріщини, так і корозійно-механічні тріщиноподібні дефекти, розміщені як в основному металі труби, так і в зварних швах, проводили за відомою методикою проф. Іванцова О.М. Згідно з нею розрахунок внутрішнього руйнівного тиску  $P_f$  дефектної труби (рис. 7), що містить зовнішні тріщини або корозійно-механічні тріщиноподібні дефекти довжиною  $L$  та максимальною глибиною  $c$ , базується на даних про параметри  $D$ ,  $t$  та границю міцності  $\sigma_B$  матеріалу газопровідної труби відповідно до залежності:

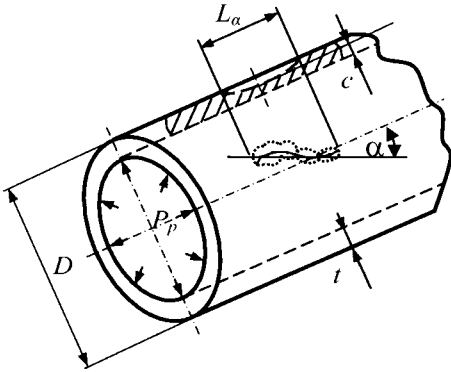
$$P_f = \frac{\frac{\sigma_B}{1,15} \eta}{\cos^2 \alpha + \mu \frac{\eta}{\eta_k} \sin^2 \alpha} \frac{2t}{D}, \quad (4)$$

де коефіцієнти, що характеризують дефект

$$\eta = \frac{1 - S/S_0}{1 - \frac{S/S_0}{q}} = \frac{1 - (\pi \cdot c/4 \cdot t)}{1 - \frac{(\pi \cdot c/4 \cdot t)}{q}}, \quad q = \sqrt{1 + 0,52 \frac{L^2}{D \cdot t}},$$

$$\eta_k = \frac{1 - S/S_0}{1 - \frac{S/S_0}{g}} = \frac{1 - (\pi \cdot c/4 \cdot t)}{1 - \frac{(\pi \cdot c/4 \cdot t)}{g}}, \quad g = \sqrt{1 + 0,08 \frac{L^2}{D \cdot t}},$$

площа дефекту  $S = \pi \cdot L \cdot c/4$ , площа умовно наскрізного дефекту  $S_0 = L \cdot t$ ,  
 $\mu$  – коефіцієнт, що враховує поздовжні і колові напруження в трубі при навантаженні її внутрішнім тиском  $0,3 \leq \mu \leq 0,5$ .

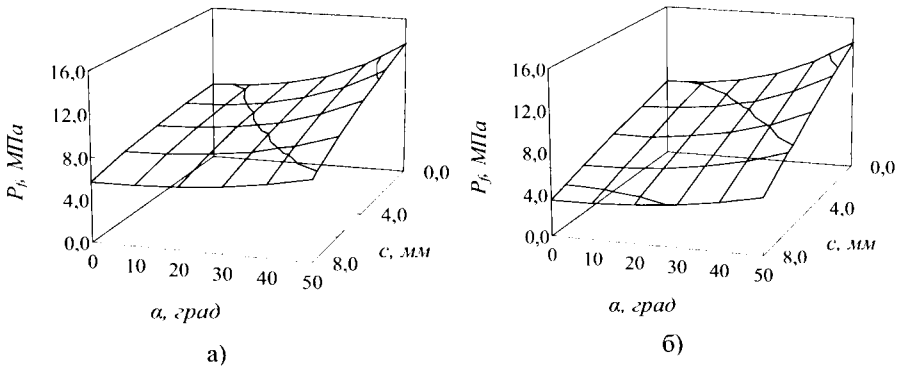


**Рис. 7. Схематичне представлення довільно орієнтованого зовнішнього ненаскрізного тріщиноподібного дефекту у стінці газопровідної труби**

Розглядаючи зміну величини руйнівного тиску  $P_r$ , до уваги брали граничні – пороговий  $L_m(\alpha)$  та критичний  $L_k(\alpha)$  – розміри (довжину) зовнішніх тріщиноподібних дефектів, припускаючи при цьому, що в процесі експлуатації трубопроводу вони розвиваються лише вглиб стінки труби. При цьому значення  $L_m(\alpha)$  та  $L_k(\alpha)$  вважалися постійними, що цілком допустимо, враховуючи незначну їх зміну при співвідношенні  $2t/D \leq 0,03$ , тобто:

$$\overline{L_m(\alpha)} = const \quad \text{та} \quad \overline{L_k(\alpha)} = const. \quad (5)$$

Аналіз одержаних результатів (рис. 8) свідчить, що у навантаженому робочим тиском  $P_p = 5,4 \text{ МПа}$  газопроводі з довільно орієнтованим тріщиноподібним дефектом, який розвивається вглиб стінки труби з близькою до порогової  $L_{th}(\alpha)$  продовгуватістю відсутні умови для лавинного руйнування труби. Однак, якщо продовгуватість тріщиноподібного дефекту наближається до критичної і він орієнтований у осьовому або близькому до нього напрямі, то потенційно можливе руйнування труби за в'язким механізмом в інтервалі глибин  $(0,5 - 0,6) \leq c/t \leq 0,8$ , що залежить від орієнтації дефекту.



**Рис. 8.** Вплив глибини  $c$  та орієнтації  $\alpha$  зовнішніх тріщиноподібних дефектів із пороговою  $L_{th}(\alpha)$ , (а) та критичною  $L_c(\alpha)$  (б) довжиною на величину руйнівного тиску  $P_p$  трубопроводів із зовнішнім діаметром  $D=820$  мм і товщиною стінки  $t_1=10$  мм (а, б)

У розділі також проведено оцінювання умов, за яких потенційно можливий ризик лавинного руйнування газопроводів з дефектами Богородчанського газотранспортного вузла, що здійснювали за методикою, представлену у розділі 2, яка дозволяє визначити критичну довжину наскрізної тріщини ( $L_{K_c}$ ) за параметром  $K_{K_c}$ . Оскільки найбільш небезпечною для газопроводу є осьова наскрізна тріщина, то для визначення її довжини використано критеріальну залежність:

$$L_{K_c} = \frac{8}{\pi} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{K_{K_c}}{F \cdot P_p}\right)^2, \quad (6)$$

де  $F$  - відома функція для циліндричної оболонки з наскрізною осьовою тріщиною під дією внутрішнього тиску  $P_p$ :

$$F = 1 + 0,072449\lambda + 0,64856\lambda^2 - 0,2327\lambda^3 + 0,038154\lambda^4 - 0,0023478\lambda^5;$$

$$\lambda = \frac{L_{кр.}}{2} \sqrt{\frac{D \cdot t}{2}}$$

Визначивши за викладеною у розділі 2 методикою величину статичної тріщиностійкості ( $K_{IC}$ ) (табл. 1) та скориставшись залежністю (6), отримасмо критичну довжину наскрізної тріщини ( $L_{кр.}$ ).

**Таблиця 1 – Характеристики статичної тріщиностійкості газопровідних сталей Богородчанського газотранспортного вузла**

Назва газопроводу	Сталь	Тривалість експлуатації, роки	Робочий тиск $P_p$ , МПа	$K_{IC}$ , (МПа $\sqrt{м}$ )	$L_{кр.}$ , мм
Пасічна – Тисмениця	10Г2С1	45	1,68	157,0	276
Відвід до м. Сторожинець	20	20	3,55	148,4	248
А 45	08Г2С1	26	3,67	144,7	134

Також проведено оцінку умов в'язкого руйнування трубопроводів тривалої експлуатації Богородчанського газотранспортного вузла. Вихідні дані для чисельних розрахунків умов, за яких потенційно можливе в'язке руйнування газопровідних труб, наведені у таблиці 2.

**Таблиця 2 – Експлуатаційні умови, характеристики міцності та типорозмір газопроводів тривалої експлуатації Богородчанського газотранспортного вузла**

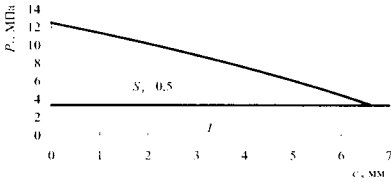
Назва газопроводу	Тривалість експлуатації, роки	Робочий тиск $P_p$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	Розмір труб $D \times t$ , мм	Радіус зони ураження $r$ , м
Пасічна – Тисмениця	45	1,68	577,0	530 $\times$ 6,6	68,0
Відвід до м. Сторожинець	20	3,55	446,0	273 $\times$ 8,0	51,0
А 45	26	3,67	623,0	1020 $\times$ 9,0	193,5

На рис. 9 наведено графічні залежності зміни величини руйнівного тиску  $P_r$  газопровідних труб з дефектами від глибини  $s$  критичного для даного газопроводу тріщиноподібного дефекту (див. табл. 1), а також зони I та II,

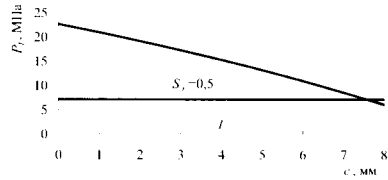
обмежені горизонтальною прямою  $S_r = 0,5$ , яка визначає умову в'язкого руйнування експлуатованої газопровідної труби.

$$L_{K_R} = 276 \text{ мм}$$

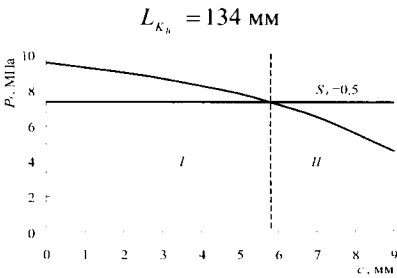
$$L_{K_R} = 248 \text{ мм}$$



а)



б)



в)

**I** – зона, в якій відсутні умови в'язкого руйнування;  
**II** – зона, в якій потенційно можливе в'язке руйнування

**Рис. 9.** Вплив глибини  $s$  осьового зовнішнього тріщиноподібного дефекту критичною довжиною  $L_{K_R}$  на величину руйнівного тиску  $P_i$  газопроводів „Пасічна – Тисмениця” (а), „Відвід до м. Сторожинець” (б), „А 45” (в)

Встановлено, що досліджувані газопроводи Богородчанського газотранспортного вузла „Пасічна – Тисмениця” та „Відвід до м. Сторожинець” за умови наявності в них зовнішніх тріщиноподібних дефектів критичної довжини ( $L_{K_R}$ ) потенційно схильні до крихкого (лавинного) руйнування, тоді як дефектна труба газопроводу „А 45” потенційно більш схильна до в'язкого руйнування.

Проведено оцінку зони ураження людей при розриві магістрального газопроводу за рекомендаціями Департаменту транспорту США:

$$r = 99 \cdot D \cdot \sqrt{P_p} \quad (7)$$

де  $r$  – радіус зони ураження, м;

$P_p$  – максимальний робочий тиск, МПа;

$D$  – зовнішній діаметр газопроводу, м.

Результати відповідних розрахунків наведено у таблиці 2.

Таким чином, запропонований експериментально-чисельний підхід та експериментально встановлені результати і закономірності сприятимуть прогнозованому оцінюванню та інтерпретації виявлених під час діагностичних оглядів довільно орієнтованих тріщиноподібних дефектів, тобто розробці

елементів системи екологічного моніторингу, а також слугуватимуть запобіганню ризику виникнення аварійних ситуацій, що містять ознаки в'язкого або крихкого руйнування, на магістральних газопроводах Богородчанського газотранспортного вузла.

У п'ятому розділі „Розроблення основних вимог до безпеки транспортування природного газу морськими шляхами за технологією CNG” запропоновано основні вимоги до безпеки транспортування природного газу морськими шляхами за допомогою „рухомого трубопроводу”.

Попередні техніко-економічні розрахунки показують, що спосіб морського транспортування стисненого природного газу за допомогою „рухомого трубопроводу”, змонтованого на звичайному судні-контейнеровозі, характеризується кращими економічними показниками порівняно з іншими транспортними технологіями. При цьому не потрібно споруджувати спеціальні дороги судна-газовози. Для реалізації проекту можна використати виключно вітчизняні матеріали, конструкції, обладнання й технології.

Основним об'єктом капіталовкладень у даній технології є CNG-модуль на основі морського контейнера.

Запропонований у дисертаційній роботі CNG-модуль з довгомірною трубою високого тиску для транспортування стисненого природного газу (рис. 10) складається зі стандартного 40-футового морського контейнера відкритого типу 1, в якому на фундаментах 2 розташовано ємність високого тиску у вигляді просторового змійовика, який складається з послідовно сполучених прямолінійних 4 та криволінійних відрізків труб, що чергуються. Фіксують змійовик до фундаментів CNG- модуля жорстко за допомогою фіксаторів.

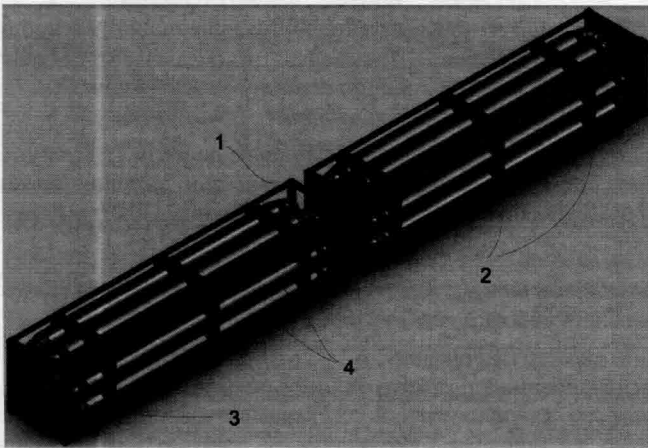


Рис. 10. CNG-модулі для перевезення газу на судах-контейнеровозах



CNG-модуль з довгомірною трубою високого тиску обладнано прямолінійними фітінгами 3 для з'єднання модулів сусідніх рядів у блоки.

Така конструкція CNG-модуля є новою і тому потребує детального розроблення: вибору матеріалів, визначення конструктивних параметрів, вибору технології виготовлення, складання, завантаження-розвантаження, забезпечення надійності та безпеки транспортування тощо.

Для вирішення проблеми розроблення CNG-модуля з оптимальними конструктивними параметрами керувалися такими вимогами.

По-перше, конструкція за мінімально можливою металоемністю повинна надійно витримувати експлуатаційні навантаження. По-друге, вона повинна бути компактною, обмеженою внутрішніми розмірами стандартного контейнера, але при цьому мати максимально корисний об'єм і достатню технологічність складання. По-третє, усі елементи модуля і технології, необхідні для його виготовлення, повинні бути, за можливості, вітчизняного виробництва.

Проаналізувавши можливі шляхи виконання даних вимог, дійшли висновку, що найбільш раціональним є конструювання CNG-модуля в такій послідовності.

Спочатку проводимо вибір з можливих варіантів сумісної реалізації другої і третьої вимог на основі існуючих розмірів стандартних труб для магістральних трубопроводів та приварених до них сталевих деталей (перехідники і відводи). На цьому етапі зупиняємося на конструкціях, основним елементом яких є стандартна труба діаметром 720 мм. У такому випадку використовується максимально можливий внутрішній об'єм контейнера (9 труб з відстанню між сусідніми 60 мм).

Для з'єднань труб у єдину систему (просторовий змійовик) було проаналізовано три можливі варіанти, які відрізняються конструкцією відводу: з круговим згином, під прямим кутом і зварний 4 секційний з кутами між секціями 45°. Для усіх варіантів конструкції передбачені стандартні перехідники від діаметра 720 мм до 630 мм.

Перехідники виконують дві важливі функції. По-перше, зменшення діаметра на криволінійних ділянках підвищує їх міцність. Як відомо, за дії внутрішнього тиску саме криволінійні ділянки трубопроводу є найбільш навантаженими. По-друге, зменшення діаметра криволінійної ділянки дає технологічну можливість проведення зварювальних робіт при з'єднанні окремих труб в просторовий змійовик. Так, за даних умов операційний простір у найбільш вузькому місці збільшується з 60 мм (автоматичне зварювання неможливе) до 150 мм, що дає можливість використати надійну технологію автоматичного зварювання.

Вибір конструкції проведено з порівняльного аналізу напружено-деформованого стану трубопроводу за різних схем відводів та інших однакових умов. Провести такий аналіз для просторового змійовика, навантаженого внутрішнім тиском, аналітичними методами практично неможливо. Тому скористалися методом скінченних елементів.

Згідно з результатами, конструкція відводу з прямим кутом є значно більш навантаженою, ніж з круговим чи секційним, які є приблизно рівноцінними. Для

подальших досліджень вибрали секційний відвід, який відрізняється значно вищою технологічністю виготовлення. Таким чином, вибрано конструкцію просторового трубопроводу.

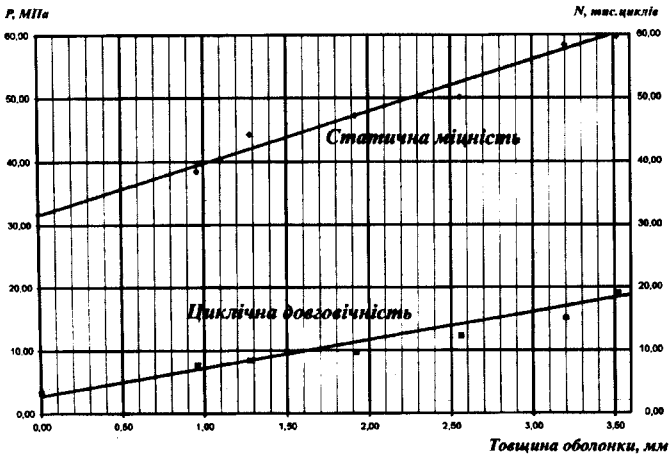
Наступним етапом досліджень є вибір матеріалу і товщини стінки елементів трубопроводу, які б забезпечили його безпеку та надійність.

Окремо слід оцінювати міцність основної труби, яка за результатами експериментальних досліджень (див. розділ 3) для зменшення металосмості армована композитним полімерним матеріалом.

Дослідження впливу композиційної підсилюючої оболонки на довговічність посудин в умовах циклічних навантажень внутрішнім тиском виконано на моделях зварного циліндричного балона з товщиною стінки 3,5 мм, циліндрична частина яких підсилювалась композиційним матеріалом.

Результати циклічних випробувань сталевого зварного корпусу моделі труби під тиском 19,6 МПа з частотою 10 циклів/хв. засвідчили, що максимальна кількість циклів, яку витримує корпус до розгерметизації (утворення втомної тріщини), не перевищує 2500÷4000.

Підсилення сталеві труби композитною оболонкою, як свідчать дані, наведені на рис. 11, сприяє підвищенню їх циклічної довговічності, яка зростає в міру збільшення товщини підсилюючої композитної оболонки. При однаковій зі сталевую трубою товщині композитної оболонки (3,6 мм) працездатність балонів в умовах циклічних навантажень зростає в 6-7 разів порівняно з працездатністю не підсиленої сталеві труби. При цьому майже вдвічі зростає міцність труби при статичному навантаженні (див. рис. 11).



**Рис. 11.**  
Залежність статичної міцності та циклічної довговічності конструкції від товщини підсилювальної композитної оболонки

Згідно з результатами розділу 3, вибрано сталь 30ХМА з такими механічними характеристиками:  $\sigma_{\mu} = 800$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 650$  МПа. Розрахунок

міцності виконуємо згідно з вимогами до трубопроводів високого тиску з коефіцієнтом запасу  $K_3$ . Тоді при  $K_3=1,75$  отримуємо:  $[\sigma]=457$  МПа. Проведено дослідження скінченно-елементної моделі просторового змійовика, які дали можливість визначити залежність мінімально допустимої товщини стінки елементів модуля від робочого тиску.

Ефективність транспортування природного газу в CNG-модулях підтверджується наступними розрахунками.

Для прикладу, судно місткістю 2240 контейнерів і швидкістю 24 вузла (44,4 км/год.), яке може одночасно перевозити у CNG-модулях понад 21 млн  $\text{м}^3$  газу за атмосферного тиску.

За попередніми розрахунками собівартість транспортування природного газу таким контейнеровозом на морській лінії порт Поті (Грузія) – Іллічівськ (Україна) довжиною 1042 км складе 25,18 USD/1000  $\text{м}^3$  або 2,42 USD/1000  $\text{м}^3$  на 100 км, що є майже утричі дешевшим транспортування газу традиційною газотранспортною системою (середня ставка транзиту на газопроводах європейських країн є 7,04 USD/1000  $\text{м}^3$  на 100 км).

Отже, запропоновано та обгрунтовано нову безпечну та ефективну конструкцію CNG-модуля для транспортування природного газу морськими шляхами.

Для забезпечення конструкційної надійності рухомого трубопроводу розроблено методологічні основи розрахунку коефіцієнту запасу міцності згідно з методами розрахунку відповідальних конструкцій на основі фізичної моделі "навантаження – опір навантаженню (міцність)". Доведено, що для оптимальної з точки зору безпеки блочної конструкції рухомого трубопроводу достатнім є коефіцієнт запасу міцності 1,75.

Проведено оцінку впливу внутрішнього тиску та діаметра труб на міцність відповідальних конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів. Аналіз проведених розрахунків дав змогу сформулювати основні вимоги та рекомендації щодо проєктування конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів.

Обгрунтовано вибір матеріалів для виготовлення елементів рухомого трубопроводу з метою його безпечної експлуатації. Запропоновано в якості конструктивних елементів „рухомого трубопроводу” використовувати секції спіральноріжової труби 720×15 мм, виготовлені на Харцизькому трубному заводі із сталі високого класу міцності API X100, з'єднані через стандартні відводи електрозварюванням за технологією гібридного зварювання, розробленою інститутом електрозварювання імені С.О. Пагона.

Удосконалено метод витіснення повітря з труб азотом для безпечної експлуатації рухомого трубопроводу. Встановлено, що для забезпечення техногенної та екологічної безпеки в рухомому трубопроводі повітря слід витіснити інертним газом (азотом) під тиском не більше 2 МПа щоб уникнути турбулентного режиму. Продування трубопроводу перед уведенням в експлуатацію повинно здійснюватись такою кількістю азоту, яка забезпечить швидкість руху газу не менше 40 м/с. Витіснення повітря вважається завершеним,

якщо вміст кисню в газі, який виходить із трубопроводу, не перевищує 0,5%. Тривалість процесу вивільнення частини „рухомого трубопроводу” від повітря та азоту 40÷45 хв.

**У шостому розділі „Методологія оцінювання екологічного впливу магістральних газопроводів на навколишнє середовище”** представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень з оцінювання екологічних впливів магістральних газопроводів на навколишнє середовище. Удосконалена методологія оцінювання впливів на навколишнє середовище при транспортуванні природного газу з використанням географічних інформаційних систем (ГІС) для моделювання екологічної ситуації, наведені результати математичного моделювання щодо формування ареалів забруднення і загазованості можливими витоками з трубопроводів, запропоновані алгоритми прогнозування екологічного ризику та розрахунку еколого-економічного збитку при аварії на ділянці магістрального газопроводу.

Наведено методологічну базу процедури оцінювання впливів магістральних газопроводів на безпеку життєдіяльності та навколишнє середовище. При цьому в дисертаційній роботі оцінено екологічні впливи етапів будівництва та експлуатації газопроводів з констатацією основних різновидів екологічних факторів та можливими альтернативами для їх розгляду у проєктах будівництва. За результатами дисертаційних досліджень узагальнена класифікація впливів та наслідків газотранспортної інфраструктури за чинниками навколишнього середовища та методами їх зменшення. Як метод контролю за станом навколишнього середовища пропонується використовувати моніторингові дослідження з ГІС-технологіями.

Вперше для зон техногенного та екологічного впливів магістральних газопроводів „Союз” і „Прогрес” на території Чортківського і Борщівського районів Тернопільської області розроблена географічна інформаційна комп’ютерна система екологічної безпеки (ГІС КСЕБ). За допомогою розробленої ГІС КСЕБ визначено екологічну ситуацію, проведено територіальний екологічний аудит, виконано оцінку екологічного стану геоекологічних смуг та спрогнозовано розвиток і зміну окремих компонентів довкілля для управління екологічною ситуацією на території впливу газопроводів „Союз” і „Прогрес”.

В дисертаційній роботі складений алгоритм і програма моделювання процесу формування ареалу забруднень і загазованості довкілля витоками з магістральних газопроводів у приземний шар атмосфери.

При утворенні свищів у стінках газопроводу витоки газу формують у ґрунто-породному комплексі ареал загазованості певних геометричних розмірів і тривалості. Це викликає суттєві втрати газу і створює небезпеку в обслуговуванні газопроводу. Тому, з практичної точки зору, важливо прогнозувати тривалість процесу фільтрації газу і радіус ареалу загазованості території до появи останнього на поверхні ґрунту.

Розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі (грунто-породний комплекс) при виникненні точкового джерела, яким є витік газу з газопроводу. Задачу доцільно виразити через рівняння швидкості фільтрації:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial W}{\partial t} - q \delta(y - H) \delta(x - l) \quad (8)$$

де  $H$  – глибина розміщення витіку від поверхні;

$l$  – віддаль по горизонталі від початку координат до джерела витіку;

$\delta$  – функція Дірака.

Математична модель реалізується методом інтегральних перетворень. Для розв'язання задачі використано синус-перетворення Фур'є по  $y$  і перетворення Лапласа за часом  $t$ . На основі запропонованої математичної моделі розроблено методологію оцінювання процесу формування ареалу загазованості грунто-породного комплексу витіком газу із газопроводу.

На основі створеної моделі для встановлення закономірностей формування поля швидкостей фільтрації газу в грунто-породному комплексі проведено обчислювальний експеримент з типовими параметрами прокладання газопроводів. В умовах експерименту приймаємо, що на глибині 1 м знаходиться точковий малий витік газу інтенсивністю 20 мм<sup>3</sup>/с через корозійний отвір в стінці труби круглої форми діаметром 2 мм. При цьому лінійна швидкість витіку газу через отвір складає 6,37 мм/с (382 мм/хв.). Проникність середовища (грунту в не порушеному стані) за умови відсутності промерзання прийнято рівною 0,5 дарсі. Вддовж осі трубопроводу (у напрямку засипання траншеї) проникність вважається в 1,5 рази більшою.

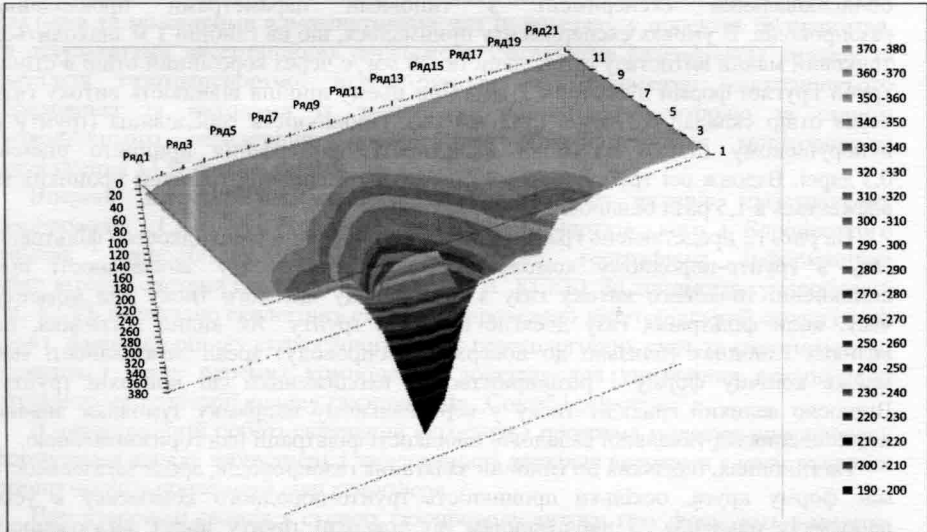
На рис. 12 представлено графічну залежність розподілу швидкостей фільтрації газу в грунто-породному комплексі і утворення ареалу загазованості при виникненні точкового витіку газу з газопроводу низького тиску для моменту часу, коли фільтрація газу досягне поверхні ґрунту. Як видно з графіка, на великих глибинах (близько до поверхні газопроводу) ареал загазованості має майже конічну форму і розширюється з наближенням до поверхні ґрунту. Відносно великий градієнт тиску у вертикальному напрямку зумовлює значне перевищення вертикальної складової швидкості фільтрації над горизонтальною.

На глибинах, близьких до глибини залягання газопроводів, ареал загазованості має форму круга, оскільки проникність грунто-породного комплексу в усіх напрямках однакова. З наближенням до поверхні ґрунту ареал загазованості витягується вздовж осі газопроводу, оскільки проникність грунто-породного комплексу в поперечному напрямку менша. Стівідношення осей еліпса ареалу загазованості на поверхні ґрунту складає 30-35% і залежить від анізотропії проникності грунто-породного комплексу. Загальна площа поверхні ареалу загазованості на поверхні ґрунту складає близько 40 м<sup>2</sup> і залежить від умов його формування.

Тривалість процесу формування ареалу загазованості в умовах проведеного обчислювального експерименту (час від моменту появи витoku до досягнення поверхні ґрунту) склав 5 хв. 23 с. Отже, індикація загазованості, викликаного появою витoku газу з газопроводу низького тиску, складе не менше 10 хв.

З метою оцінки можливих параметрів формування ареалу загазованості проводились розрахунки за різних значень величини витрати витoku для ґрунтів різної проникності.

Величина витрати газу через корозійне пошкодження змінювалась у діапазоні 50% від зазначеної, тобто в межах 10 - 30 мм<sup>3</sup> /с. Встановлено, що при зміні витрати витoku характер формування ареалу загазованості практично не змінюється. Збільшення витрати витoku на 50% призводить до скорочення тривалості формування ареалу загазованості на величину до 15% при зростанні площі на поверхні ґрунту на величину до 28%. Зі зменшенням витрати витoku на 50% тривалість формування ареалу загазованості зростає на величину до 77%, а площа ареалу на поверхні ґрунту зменшується на 12%.



**Рис. 12. Результати математичного моделювання поля швидкостей фільтрації при появі витoku з газопроводу**

Таким чином, має місце нелінійна залежність параметрів формування ареалу загазованості від величини витрати витoku природного газу. Зменшення витрати витoku призводить до суттєвого збільшення тривалості формування ареалу загазованості і до незначного зменшення площі ареалу на поверхні ґрунту, тому

малі за величиною витрати витрати є небезпечними з екологічної точки зору як локальні джерела забруднення приземного шару атмосфери.

Оцінюючи ризик виникнення аварій на магістральних газопроводах, в дисертаційній роботі проведено імітаційне моделювання, яке дозволяє не тільки оперативно прогнозувати, але й розробляти рекомендації щодо зменшення ризику та ліквідації наслідків надзвичайних аварійних ситуацій. За запропонованою моделлю було проведено розрахунки зони детонації і дальності розповсюдження хмари вибухонебезпечної суміші за різних швидкостей вітру.

Враховуючи результати проведених у шостому розділі досліджень, удосконалено методика розрахунку еколого-економічних збитків при моделюванні аварійних ситуацій на магістральних газопроводах та розроблено програмне забезпечення для цих розрахунків.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено обґрунтування і вирішення важливої науково-технічної проблеми загальногосподарського значення, яка полягає у розробці методології оцінювання негативного впливу газотранспортної інфраструктури на навколишнє середовище та його зменшення. У результаті виконання роботи отримано такі основні результати:

1. На базі нових методичних підходів одержано комплекс нових експериментальних даних про характеристики міцності та тріщиностійкості трубопровідних сталей магістральних газопроводів тривалої експлуатації (на прикладі Богородчанського газотранспортного вузла), що дає можливість виявляти процеси неконтрольованого в'язкого та крихкого (лавинного) руйнування трубопроводів.

2. Створена модель і технологія виготовлення легких та надійних в експлуатації зварних балонів для безпечного транспортування і зберігання природного газу, в яких для зменшення маси використані високоміцні сталі та композиційні матеріали вітчизняного виробництва. Довговічність створеної конструкції металопластикових балонів складає не менше 25 років, що відповідає термінам експлуатації сучасних суден-контейнеровозів, а показники масової досконалості балонів ( $M/V = 0,65 \text{ кг/дм}^3$ ) дають змогу збільшити об'єм завантаження газозовів та підвищити їх ефективність і екологічну безпеку.

3. Запропоновано методологію оцінювання умов руйнування лінійної частини трубопроводу із довільно розміщеними наскрізними тріщинами. Встановлені критеріальні залежності дозволяють оцінити розміри порогових (утворення свища) та критичних (лавинне руйнування труби) наскрізних тріщин у стінках труб магістральних газопроводів тривалої експлуатації, що дає змогу прогнозувати ступінь техногенно-екологічної небезпеки при їх утворенні, кількісну оцінку економічних збитків, а також зони розлітання фрагментів газопровідної труби та під час загорання пожежно-вибухової вуглеводневої

суміші. Зокрема встановлено, що для Богородчанського газотранспортного вузла труби газопроводів з дефектами „Пасічна Тисмениця” та „Відвід до м. Сторожинець” руйнуються на повний переріз (крихко), причому зона ураження відповідно складає 68 м та 51 м.

4. Розроблено методологію та встановлено критеріальні залежності оцінки умов руйнування лінійної частини трубопроводу із зовнішніми, довільно розміщеними ненаскрізними тріщиноподібними дефектами заданої глибини. Запропонований експериментально-чисельний підхід та одержані на його основі результати сприятимуть прогностичній оцінці та інтерпретації виявлених під час діагностичних оглядів довільно орієнтованих тріщиноподібних дефектів, розробленні системи екологічного моніторингу, а також слугуватимуть запобіганню ризику виникнення аварійних ситуацій, що містять ознаки в'язкого руйнування, на магістральних газопроводах. Встановлено, що окремі трубопроводи тривалої експлуатації Богородчанського газотранспортного вузла, наприклад, газопровід „А 45” з подовгуватими осьовими тріщиноподібними дефектами, потенційно більш схильний до в'язкого (пластичного) руйнування шляхом утворення наскрізного отвору (свища).

5. Розроблено та обґрунтовано розрахункову модель для визначення параметрів CNG-модуля з довгомірною трубою високого тиску (рухомого трубопроводу), на основі якої розроблено технологічно і екологічно безпечну та економічно вигідну CNG-технологію для транспортування природного газу морськими шляхами. Зокрема, розроблено конструкцію CNG-модуля з довгомірною трубою високого тиску для транспортування природного газу суднами-контейнеровозами.

6. Розроблено методику витіснення повітря в рухомому трубопроводі інертним газом (азотом). З метою уникнення турбулентного режиму процес здійснюється під тиском не більше 2 МПа. Продування трубопроводу перед введенням в експлуатацію повинно здійснюватись такою кількістю азоту, яка забезпечить швидкість руху газу не менше 40 м/с. Витіснення повітря вважається завершеним, якщо вміст кисню в газі, який виходить із трубопроводу, не перевищує 0,5%. Тривалість процесу вивільнення „рухомого трубопроводу” довжиною 60 км від повітря та азоту складає  $40 \pm 45$  хв. Дана методика забезпечує пожежо- і вибухобезпеку завантаження рухомого трубопроводу при введенні його в експлуатацію.

7. Установлено, що має місце нелінійна залежність параметрів формування аресалу забруднення ґрунто-породного комплексу від величини витрати витоку природного газу з підземного газопроводу. Зокрема, зменшення витрати витоку призводить до суттєвого збільшення тривалості формування аресалу загазованості і до незначного зменшення площі аресалу на поверхні ґрунту. Тому з екологічної точки зору малі за величиною витрати витоки є небезпечними.

8. Здійснено оцінку впливу зони детонації і дальності розповсюдження хмари вибухонебезпечної суміші під час моделювання аварій на магістральних газопроводах Богородчанського газотранспортного вузла й розроблено



рекомендації щодо зниження ризику виникнення небезпечних ситуацій, що дає змогу зменшити наслідки негативного впливу на безпеку життєдіяльності, навколишнє середовище та інфраструктуру.

9. За запропонованими підходами розроблено методичні рекомендації, які використовуються в УМГ „ПРИКАТПАТТРАНСГАЗ”, ІФНТУНГ, Державній екологічній інспекції, Державному управлінні охорони навколишнього середовища в Івано-Франківській області.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії

1. Адаменко О. М. Екологічна безпека збалансованого ресурсокористування в Карпатському регіоні: Монографія / О. М. Адаменко, Я. О. Адаменко, Л. М. Архипова, В. Ф. Головачук, Д. О. Зорін, **О. М. Мандрик**, Л. В. Міщенко, М. М. Приходько, М. З. Хашак - Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2013. 368 с. *Дисертанту належить концепція екологічної безпеки.*

### Патенти

2. Деклараційний патент на корисну модель № 67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомих трубопроводом / Патон Б. С., Крижанівський С. 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. *Дисертанту належить розробка методології досліджень рухомих трубопроводів.*
3. Деклараційний патент на корисну модель № 67658 Україна, МПК B63B 25/00. Баржа-пліт для транспортування стиснутого природного газу / Патон Б. С., Крижанівський С. 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. *Дисертанту належить аналіз результатів досліджень безпечного транспортування природного газу.*

### Статті

4. **Мандрик О. М.** Дослідження причин формування арсалів забруднення атмосфери в районах експлуатації нафтогазових об'єктів / О. М. Мандрик, Я. М. Семчук // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – №2(14). – С. 54-57. *Дисертанту належать: ідея роботи, методологія досліджень.*

5. Адаменко Я. О. Основні принципи організації системи екологічного моніторингу довкілля у межах території нафтогазових промислів Богородчанського району / Я. О. Адаменко, **О. М. Мандрик**, М. В. Знак, Я. І. Лопушняк, З. Б. Горбачевський // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2010. – №1. – С. 5-11. *Дисертанту належить концепція екологічного моніторингу.*
6. **Мандрик О. М.** Джерела екологічної безпеки та їх вплив на довкілля / О. М. Мандрик // Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. – 2011. – №1. – С. 105-109.
7. Архипова Л. М. Концепція екологічної безпеки басейнових систем районів нафто- газовидобування / Л. М. Архипова, Я. О. Адаменко, **О. М. Мандрик** // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2012. – №2(6). С. 67-72. *Дисертанту належить формулювання та обґрунтування наукових завдань.*
8. Зайцев Вал. В. Розрахунок міцності конічно-циліндричних елементів рухомих трубопроводів / Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, **О. М. Мандрик** // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2012. №3(44). – С. 187-193. *Дисертанту належить аналіз та інтерпретація результатів досліджень.*
9. Крижанівський Є. І. Конструювання CNG-модуля для транспортування природного газу суднами-контейнеровозами / Є. І. Крижанівський, В. І. Артим, **О. М. Мандрик**, М. М. Савицький // Нафтогазова енергетика. – 2012. – №1(17). – С. 28-35. *Дисертанту належить обґрунтування наукових завдань.*
10. Шкіца Л. С. Дослідження формування арсалів забруднення і загазованості витокami з трубопроводів на математичних моделях / Л. С. Шкіца, В. Я. Грудз, О. В. Палійчук, **О. М. Мандрик** // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – №4(45). – С. 39-45. *Дисертанту належить ідея оцінювання екологічних аспектів.*
11. Артим В. І. Удосконалення засобів тензометрування для підвищення безпеки експлуатації відповідального великогабаритного обладнання / В. І. Артим, П. М. Райтер, **О. М. Мандрик**, В. Р. Осадца // Нафтогазова енергетика. – 2012. №2(18). С.37-46. *Автору належить мета, аналіз та інтерпретація результатів досліджень.*
12. Kryzhanivskyy Ye. I. About the possibility of transportation of compressed natural gas by sybmarine carriers of mobile pipelines in arctic / Ye. I. Kryzhanivskyy, Val. V. Zaytsev, **О. М. Mandryk** // Scientific Bulletin Seria C – Baia Mare. – Volume XXVI No.1. – 2012 – p. 28-31. *Дисертанту належить постановка завдань та методологія досліджень.*
13. Arkhipova L. M. Estimation of ecological danger of technical systems // L. M. Arkhipova, **О. М. Mandryk**, Y. O. Adamenko, L. E. Shkitsa // Scientific Bulletin Baia Mare. 2012. Volume XXVI, No.2. p. 27-33. *Дисертанту належить аналіз та інтерпретація результатів досліджень.*

14. Крижанівський Є. І. Оцінювання роботоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності / Є. І. Крижанівський, Р. С. Грабовський, **О. М. Мандрик** // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2013. – Т.49, № 1.– С. 105-111. *Дисертанту належить розробка методології досліджень, концепцій та стратегій.*
15. Крижанівський Є. І. Оцінка умов лавинного руйнування трубопроводів із наскрізними та ненаскрізними довільно розміщеними зовнішніми тріщиноподібними дефектами заданої глибини / Є. І. Крижанівський, **О.М. Мандрик**, Р.С. Грабовський, О.Т. Касій // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2013. – №1(34). – С. 140-146. *Дисертант є автором в частині оцінки впливу умов лавинного руйнування трубопроводів.*
16. **Мандрик О. М.** Екологічні та економічні наслідки аварій на магістральних трубопроводах / О. М. Мандрик // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2013. – №1(7). – С.160-165.
17. **Мандрик О. М.** Визначення техніко-економічних параметрів модуля суднового рухомого трубопроводу / О. М. Мандрик, Вал. В. Зайцев // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – №1(46). – С. 179-187. *Дисертанту належить постановка завдань, методологія та інтерпретація результатів досліджень.*
18. **Мандрик О. М.** Прогнозування екологічного ризику при аварії на дільниці магістрального газопроводу (на прикладі Богородчанського району) / О.М. Мандрик // Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ – 2013. – №1(15). С.59-63.
19. **Мандрик О. М.** Експрес-оцінка умов гільйотинного руйнування тривало експлуатованих газопроводів / О.М. Мандрик, Л.С. Шкіца, Р.С. Грабовський, О.Т. Касій // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. Луцьк: Луцьк. держ. техн. ун-т, 2013. - Вип. 42. – С. 166-174. – (напряв “Інженерна механіка”). *Дисертант є автором в частині оцінювання впливу умов гільйотинного руйнування газопроводів.*
20. Савицький О. М. Особливості конструкції і надійність зварних комбінованих балонів високого тиску / О. М. Савицький, **О. М. Мандрик**, М. М. Савицький // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2013. - №2 (47).– С. 133-144. *Дисертанту належить аналіз та інтерпретація результатів досліджень.*
21. **Мандрик О. М.** Аналіз методів зміцнення замкнутих ємностей для безпечного транспортування природного газу / О. М. Мандрик, О. М. Савицький, В. І. Артим // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. Луцьк: Луцьк. держ. техн. ун-т, 2013. – Вип. 40. С. 176-186. – (напряв “Інженерна механіка”). *Дисертанту належить розробка методології досліджень, концепцій та стратегій.*
22. **Мандрик О. М.** Розрахункова оцінка умов гільйотинного руйнування магістрального газопроводу з тріщиноподібним дефектом / О. М. Мандрик, Р. С. Грабовський, О. Т. Касій // Машинознавство. – 2013. – №3-4 (187). С. 3-7. *Дисертанту належить оцінка та інтерпретація результатів досліджень.*

23. **Мандрик О. М.** Техногенна та екологічна безпеки при транспортуванні природного газу суднами-контейнеровозами / О. М. Мандрик, О. М. Сусак // *Нафтогазова енергетика*. – 2013. – №1 (19) – С. 28–35. *Дисертанту належить постановка завдань, методологія та інтерпретація результатів досліджень.*
24. **Мандрик О. М.** Комплексна екологічна оцінка впливу магістральних трубопроводів на довкілля з використанням геоінформаційних систем / О.М. Мандрик // *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. – 2013. – №2 (8). – С. 12-20.

#### Тези доповідей

25. **Мандрик О. М.** Стан довкілля Івано-Франківської області у зв'язку з туристично-рекреаційним використання її території / О. М. Мандрик, Я.О.Адаменко, А.О. Коншина // Спеціальний випуск до IV науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – 2009. – С.27-29. *Дисертанту належить постановка завдань та методологія досліджень.*
26. **Мандрик О. М.** Геоінформаційне моделювання екологічної безпеки території Закарпаття/ О.М. Мандрик, Л.В. Міщенко, Д.О. Зорін, Г.О. Кашпурович, Л.В. Алексик // *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Спеціальний випуск до V науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування».* – 2010. – С. 109-112. *Дисертанту належить концепція екологічної безпеки.*
27. **Мандрик О. М.** Екологічна оцінка впливу техногенних об'єктів на компоненти довкілля Передкарпаття / О. М. Мандрик : Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Карпатська конвенція з проблем охорони довкілля», (м. Мукачеве – м. Ужгород 15-18 травня 2011 р.). – Ужгород: УжНУ, 2011. – С.212-214.
28. **Мандрик О. М.** Концепція екологічної безпеки басейнових систем районів нафтогазовидобування / О. М. Мандрик, Л. М. Архипова, Я. О. Адаменко // Міжнародна науково-технічна конференція "Нафтогазова енергетика - 2011", (м. Івано-Франківськ 10-14 листопада 2011 р.) : Анотації. – Івано-Франківськ: 2011. – С.120-121. *Дисертант є автором в частині оцінювання впливу нафтогазопроводів на навколишнє середовище.*
29. **Мандрик О. М.** Основні принципи організації системи екологічного моніторингу довкілля у межах території нафтогазових промислів Богородчанського району / О. М. Мандрик, Я. О. Адаменко, О. Ю. Ленів, Т.Б. Качала // Програма Всеукраїнської науково-практичної конференції "Безпека об'єктів нафтогазового комплексу" (м. Івано-Франківськ 5-7 жовтня 2011 р.). – Івано-Франківськ: 2011. – С. 70-80. *Дисертанту належить концепція екологічного моніторингу.*

30. **Мандрик О. М.** Джерела екологічної безпеки та їх вплив на довкілля./ О. М. Мандрик // Спеціальний випуск до VI науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». 2011. С. 105-109.
31. **Mandryk O. M.** The concept of creation of Dnister scientific training and industrial modeling flood polygon/ О. М. Mandryk, Y. O. Adamenko, L. M. Arkhipova // 2nd International Conference "Alpine-Petrol 2012" on "Geology, Ecology and Petroleum Perspectives of the Carpathians and other Alpine regions in Europe" 25th- 28th September, 2012 Kraków - Poland. – P. 85-86. *Автору належить постановка завдань і методологія екологічної безпеки.*
32. Адаменко Я.О. Природно-техногенна безпека гідроекосистем при будівництві туристичних комплексів / Я. О. Адаменко, Л. М. Архіпова, **О. М. Мандрик** // Еколого-правові та економічні аспекти екологічної безпеки регіонів: Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції за участю молодих науковців (м. Харків, 17-19 жовтня 2012 р.) Х.: ХНАДУ, 2012. – С. 45-46. *Автору належить методологія природно-техногенної безпеки.*
33. **Мандрик О. М.** CNG технології. Техногенна та екологічна безпеки при транспортуванні природного газу суднами-контейнеровозами / О. М. Мандрик, О. М. Сусак // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу", (м. Івано-Франківськ 15-18 травня 2012 р.). Івано-Франківськ: 2012. – С.5-8. *Дисертанту належить концепція техногенної та екологічної безпеки.*
34. **Мандрик О. М.** Моделювання екологічного ризику надзвичайної ситуації при аварії на газотранспортному вузлі ( на прикладі Богородчанського району ) / О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції „Наука і техніка: виклики сьогодення”, (м. Київ, 08-09 лютого 2013 р.). – К.: 2013. С.40-45. *Дисертанту належить постановка завдань, методологія та інтерпретація результатів досліджень.*
35. **Мандрик О. М.** Екологічні та економічні наслідки аварійних ситуацій газотранспортних систем/ О. М. Мандрик, Ю. Д. Михайлюк // Materials of the tenth international research and practice conference « Problems and perspectives of development of world science» (Donetsk 15-17.02.2013). Донецьк: 2013. – С.46-52. *Дисертанту належить розробка методології досліджень, концепцій та стратегій.*

## АНОТАЦІЯ

**Мандрик О.М. Развитие научных основ повышения уровня экологической безопасности при транспортировании природного газа. – Рукопись.**

Диссертация на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013.

Диссертацию посвящено вирішенню проблеми безпечного транспортування природного газу, розробки методології оцінювання негативного впливу газотранспортної інфраструктури на навколишнє середовище та його зменшення.

Для підвищення техногенної та екологічної безпеки магістральних газопроводів з тривалим терміном експлуатації розроблено нові методологічні підходи до визначення умов неконтрольованого руйнування газопроводів із зовнішніми, довільно розміщеними наскрізними тріщинами та ненаскрізними тріщиноподібними дефектами визначної глибини, а також встановлено залежність параметрів формування ареалу забруднення ґрунту витокami природного газу із газопроводів від величини витрати витоку. Для екологічно безпечного транспортування стисненого природного газу морськими шляхами розроблено та обґрунтовано конструкцію CNG-модуля з довгомірною трубою високого тиску (рухомого трубопроводу) та розроблено нову технологію продажування рухомого трубопроводу інертним газом перед введенням його в експлуатацію для забезпечення відсутності умов виникнення вибуху.

Комплексне врахування теоретичних та експериментальних досліджень дало змогу удосконалити методи оцінки екологічної небезпеки транспортування природного газу та розробити заходи щодо її зменшення.

**Ключові слова:** екологічна безпека, природний газ, магістральний газопровід, CNG-технології, екологічний моніторинг.

## АННОТАЦИЯ

**Мандрык О.Н. Развитие научных основ повышения уровня экологической безопасности при транспортировании природного газа. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2013.

Диссертация посвящена разработке методологических подходов к решению проблемы оценки негативного влияния газотранспортной инфраструктуры на окружающую среду и его уменьшения.

Разработана методология оценки условий разрушения линейной части газопровода со сквозными трещинами и внешними трещиноподобными дефектами заданной глубины и ориентации. Для оценки неконтролируемого разрушения длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов

Богородчанского газотранспортного узла получен комплекс новых экспериментальных данных об их параметрах прочности и трещиностойкости. Установленные критерии служат для разработки системы экологического мониторинга и прогнозирования экологической опасности трещиноподобных дефектов газопроводов.

Разработана технология изготовления легких и надежных в эксплуатации сварных металлопластиковых баллонов для безопасной транспортировки и сохранения природного газа. Их долговечность составляет не менее 25 лет.

Разработана экологически безопасная и экономически выгодная CNG-технология подвижного трубопровода для транспортирования сжатого природного газа морскими путями. Разработана методика вытеснения воздуха в подвижном трубопроводе инертным газом (азотом). Данная методика обеспечивает пожаро- и взрывобезопасность загрузки подвижного трубопровода при введении его в эксплуатацию.

Установлено, что имеет место нелинейная зависимость параметров формирования арсала загазованности от величины утечки газа. Так, уменьшение величины утечки приводит к существенному увеличению длительности формирования арсала загазованности и до незначительного уменьшения площади арсала на поверхности грунта.

Произведен прогноз оценки влияния зоны детонации и дальности распространения облака взрывоопасной смеси при потенциально возможных авариях на магистральных газопроводах Богородчанского газотранспортного узла и разработаны рекомендации по снижению их экологического риска.

Комплексный учет теоретических и экспериментальных исследований позволил усовершенствовать методы оценки уровня экологической опасности при транспортировке природного газа и разработать меры по ее уменьшению.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, природный газ, магистральный газопровод, CNG-технологии, экологический мониторинг.

## ABSTRACT

**Mandryk O. M. The development of scientific principles of ecological safety level enhancement in natural gas transportation. – Manuscript.**

Doctoral thesis for obtaining Doctor of Science Degree in speciality 21.06.01 – ecological safety. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2013.

The thesis deals with solving the problem of methodology development for evaluating the negative impact of gas transportation infrastructure on the environment and its reduction.

For the gas pipelines of long-term operation the new technological approaches have been developed for determining the conditions of uncontrollable gas pipelines failure by anywhere located outer through cracks and non-through crack-like defects of the measured depth. The dependence of areal soil contamination parameters formation

caused by natural gas leakage from the pipelines on the value of flow rate was determined. For environmentally safe offshore transportation of compressed natural gas the design of CNG-module containing pipe length of high pressure (mobile pipeline) was developed and substantiated as well as the new technology of mobile pipeline blasting by inert gas before its commissioning was worked out to insure explosion-free conditions.

Complex consideration of theoretical and experimental researches enabled us to improve the techniques of ecological hazard evaluation during natural gas transportation and to develop out measures for its reduction.

**Key words:** ecological safety, natural gas, main pipeline, CNG-technologies, ecological monitoring.