

3 Хейн А.Л., Бузинов С.Н., Алтухов П.Я. Экспериментальное исследование процесса двухстадийной осушки водоносного пласта газом. // Вопросы подземного хранения газа в водоносных структурах: Труды ВНИИГАЗ. – 1961. – Вып. 11(19). – С. 296-345.

4 Ширковский А.И. Определение и использование физических параметров пористой среды при разработке газоконденсатных место-

рождений. // ВНИИЭгазпром. Серия: Геология, разведка и разработка газовых и газоконденсатных месторождений. – 1971. – С. 49.

5 Гимматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1982. – 312 с.

6 Коротаев Ю.П., Ширковский А.И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1984. – 487 с.

УДК 621.643

## ЖИВУЧИСТЬ МОРСЬКИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Л.Я.Побережний

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail poberezhny@nuing.edu.ua

*На основани анализ результатов усталостных испытаний определены области низкочастотной усталости для стали морских нефтегазопроводов. Предложен способ прогнозирования их живучести в нештатных ситуациях.*

*On the basis of fatigue tests results analysis the areas of low-frequency fatigue are obtained for marine pipelines steel. The method of its survivability prognosis in nonpermanent situations is offered.*

Найекономічнішим за енерговитратами видом транспорту продукції морських родовищ є трубопровідний [1]. Незважаючи на те, що капіталовкладення в об'єкти транспорту нафти і газу на морі дуже великі, рівень техніки та технології в цій області дає змогу промислово розвинути країнам з достатньою ефективністю експлуатувати трубопровідні системи великої протяжності (понад 500 км) та продуктивності.

Витікання нафти з морських нафтопроводів є вкрай небезпечним в екологічному плані, а збирання розлитої в морі нафти є складною, великовартісною операцією, що потребує використання спеціальних технічних засобів.

На сьогодні найпоширенішими в світі є сталеві нафтогазопроводи, хоча ведуться інтенсивні пошуки нових матеріалів для підводних трубопроводів.

Світовий досвід проектування, будівництва та експлуатації морських трубопроводів показав, що такі достатньо складні інженерні споруди можуть успішно створюватися та удосконалюватися лише при всебічному вивченні умов їх роботи та проведенні наукового пошуку, зокрема, досліджень, що стосуються глобальної проблеми міцності матеріалу трубопроводу в робочих (технологічних) середовищах.

Аналіз причин аварій морських трубопроводів свідчить, що приблизно 75% всіх пошкоджень відбувається внаслідок впливу на трубопровід хвиль та течій. Цей вплив є не лише одним з найнебезпечніших та найпоширеніших, але й найменш прогнозованим. Так, трубопровід, укладений в траншею та засипаний піском, під час шторму може вийти на поверхню ґрунту та піддаватися активному впливу хвиль і течій,

в результаті чого може утворитися ділянка, що провисає та здійснює коливання. Це, в свою чергу, спричинює деформацію (згин трубопроводу), призводить до розтріскування залізобетонної оболонки та розриву ізоляційного покриття, проникнення морської води до металу трубопроводу, утворення вторинних концентраторів напружень, що в комплексі викликає передчасне руйнування.

Сьогодні визнається, що найнебезпечнішим є низькочастотне втомне та корозійно-втомне руйнування несучих елементів морських трубопроводів, яке важко діагностувати. Це пов'язано як з умовами експлуатації, так і зі специфікою прояву низькочастотного навантаження, особливо якщо врахувати, що вплив середовища та змінних напружень носить часову залежність.

Специфічні умови спорудження та експлуатації морських трубопровідних систем визначаються, перш за все, глибиною акваторії, параметрами морських чи океанських хвиль, наявністю сильних підводних течій, топографією дна та його стійкістю до переформування (глибиною розмивання), корозійним та температурним факторами. Навантаження статичного та динамічного характеру, викликані складними умовами експлуатації, можуть одночасно діяти на лінійну частину трубопроводу в найрізноманітніших комбінаціях та змінюватися за величиною, напрямком, частотою та інтенсивністю в широкому діапазоні. Деякі навантаження визначаються з точністю, достатньою для інженерних розрахунків, але безумовно більшість з них обчислюється надто наближено. Особливо складно врахувати навантаження, спричинені дією навколишнього середовища, тим більше,

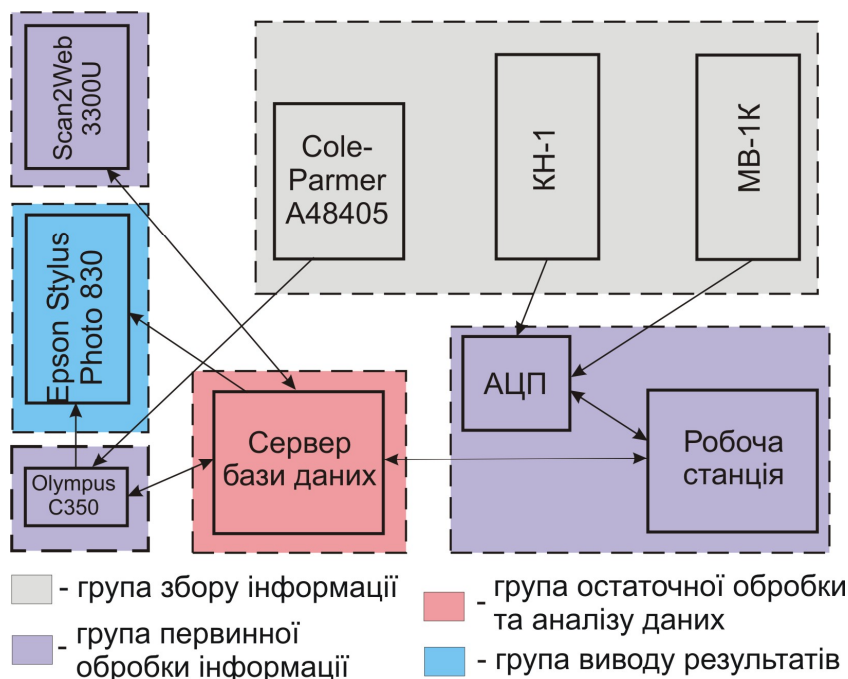


Рисунок 1 – Схема автоматизованої випробувальної системи з ЕОМ

що швидкість чи частота їх зміни на різних ділянках трубопроводу може істотно відрізнятися.

В процесі тривалої експлуатації морських трубопроводів (30 років і більше), що проходить у постійній взаємодії з морським середовищем, відбувається закономірна зміна напружено-деформованого стану несучих елементів при найрізноманітніших комбінаціях статичних та динамічних силових факторів і впливів.

Актуальність цієї проблеми значною мірою пов'язана зі швидким зростанням морського видобутку нафти і газу та їх транспортуванням на сушу.

При розрахунку морських трубопроводів важливо правильно вибрати розрахункову схему, яка давала б змогу з використанням існуючого рівня розвитку розрахункових методів визначати напружено-деформований стан, зумовлений навантаженнями та впливами, що діють у різні періоди і при цьому достатньо повно та реалістично описують умови експлуатації трубопроводу.

Згідно існуючих в Україні нормативних документів, розрахунок морських трубопроводів на міцність та деформівну здатність базується на стандартних характеристиках трубних сталей чи зварних з'єднань, встановлених для вихідного (передексплуатаційного) їх стану, що не відповідає сучасним вимогам.

В європейській практиці, при розрахунку підводних трубопроводів на міцність, враховуються допустимі напруження та деформації, які приймаються різними для періодів будівництва та експлуатації. В кожному з цих двох розрахункових випадків розглядаються найнесприятливіші поєднання навантажень та впливів.

Сьогодні визнається, що найнебезпечнішим є низькочастотне втомне та корозійно-втомне

руйнування несучих елементів морських трубопроводів, яке важко діагностувати. Це пов'язано як з умовами експлуатації, так і зі специфікою прояву низькочастотного навантаження, особливо якщо врахувати, що вплив середовища та змінних напружень носить часову залежність.

При вирішенні задач оптимізації сучасних конструкцій морських трубопроводів та забезпечення їх працездатного стану протягом тривалого періоду експлуатації, що може складати 20–30 років і більше [1], надзвичайно важливим є прогнозування поведінки сталі трубопроводу при низькочастотному мало- та багатоцикловому навантаженні.

Основну увагу зараз слід приділяти не розробці способів ліквідації аварійних ситуацій, а удосконаленню прогнозування відмов трубопроводів та визначенню їх живучості. Це дасть змогу коректніше та адекватніше оцінити експлуатаційні ризики та розробити заходи з їх мінімізації, підвищення якості ризик-аналізу має надзвичайно велике значення, оскільки навіть незначні відмови можуть спричинити важкі наслідки для доквілля.

Важливого значення набувають оригінальна методика та результати дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування морських трубопроводів на базі розробленої автоматизованої випробувальної системи з ЕОМ (рис. 1) [2, 3], яка дає змогу запису та подальшого аналізу кінетики деформації матеріалу трубопроводів від початку навантаження до руйнування (рис. 2), визначення деформаційних областей низькочастотної втоми, моменту початку прискореного поширення втомної тріщини та оцінити живучість трубопроводу.

Розроблена методика дає змогу підняти на якісно новий рівень дослідження поведінки

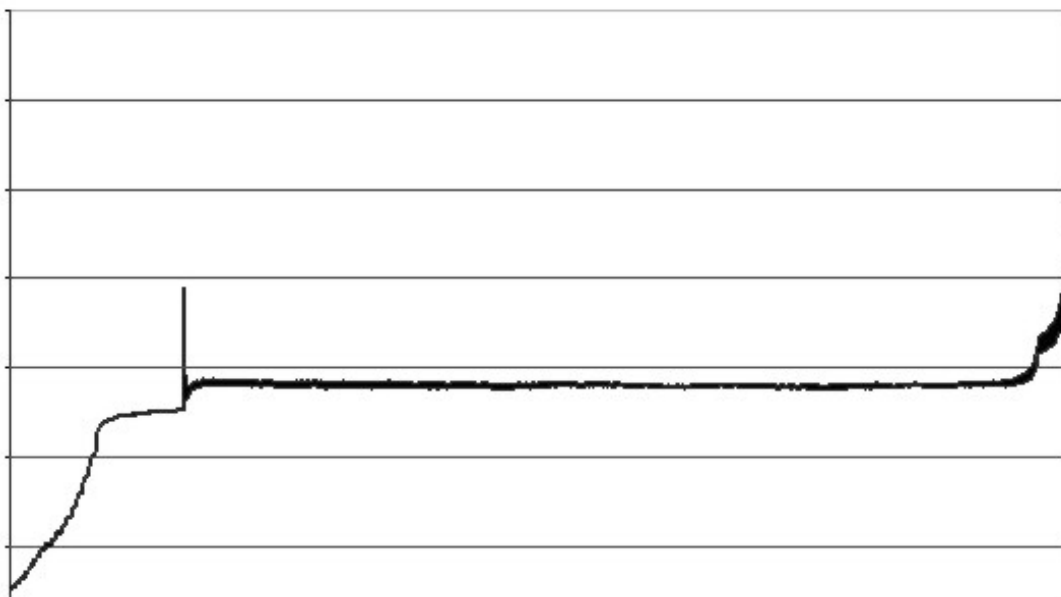


Рисунок 2 – Загальний вигляд кінетичної кривої деформації

сталі в конструкції трубопроводу, прослідкувати вплив як мікро- так і макроструктурних чинників на довговічність матеріалу трубопроводу, та здійснювати достатньо точне прогнозування ресурсу роботи, залишкового ресурсу роботи, ресурсу роботи конструкції з моменту пошкодження покриття тощо.

Об'єктом досліджень вибрано безшовні гарячедеформовані труби зі сталі 20 з вмістом Карбону 0,17–0,24% діаметром до 426 мм, які широко використовуються при спорудженні морських трубопроводів. В результаті доволі складної технології їх виробництва в матеріалі труби – низьковуглецевій сталі формується напружений стан з текстурованими компонентами (втягнутими в напрямку прокатки труб зернами фериту та перліту). Виникає відчутна анізотропія фізико-механічних властивостей текстурованої сталі 20. Механічні властивості вздовж осі волокна покращуються, а в напрямку, перпендикулярному осі текстури, – погіршуються. Тому питанням вибору чи визначення механічних характеристик, придатних для практичної оцінки та розрахунку напружено-деформованого стану сталі в конструкції трубопроводу, необхідно приділяти особливу увагу і обов'язково пов'язувати цей вибір з попереднім аналізом складних умов експлуатації морських трубопроводів. Експериментальні зразки-моделі виготовляли із заготовок, вирізаних зі стінки труби, за розробленою в ІФНТУНГ технологією, яка забезпечує високу точність та задану шорсткість робочих поверхонь при використанні механообробки із запрограмованою змінною подачі. Така технологія вигідно відрізняється від використовуваної раніше, коли до робочої частини, вирізаної із зони зварного з'єднання магістрального трубопроводу, приварювали головки, використовуючи кінцеву обробку заготовок зразків з однієї установки в центрах. Розроблено також оригінальне про-

грамне забезпечення, яке дає змогу, крім стандартних можливостей запису вимірюваних величин у файл та одночасної побудови графічних залежностей в режимі реального часу, регулювати частоту вимірів залежно від швидкості зміни вимірюваного параметра.

Випробовування циліндричних зразків-моделей довжиною  $l = 150$  мм та діаметром робочої частини  $d = 5$  мм. На першому етапі проводили безпосереднє ступінчасте навантаження (розвантаження) зразка-моделі, яке відповідає абсолютній податливості машини, коли зі зменшенням опірності зразка навантаження, що передається на нього, не зменшується. При збільшенні чи зменшенні навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину  $\Delta\sigma = 20$  МПа за час  $t_n(p) = 1$  с. Час витримки на кожному ступені  $t_v = 19$  с, а сумарний час  $\Delta t = t_n(p) + t_v = 20$  с. Це дало змогу відстежити процеси низькотемпературної повзучості та отримати додаткову інформацію про деформаційну поведінку сталі трубопроводу (рис. 2).

Наступним етапом були втомні випробовування, які проводили при частоті навантаження 0,8 Гц, імітуючи експлуатаційні навантаження від руху хвиль та вплив підводних течій.

На основі проведених втомних випробовувань визначено області низькочастотної втоми для сталі трубопроводу. Їх тривалість ілюструє таблиця 1. Спостерігається п'ятистадійна кінетика деформації в області високих амплітуд напружень (більше 380 МПа) [4] та тристадійна в області нижчих амплітуд. На основі деформаційно-кінетичного аналізу процесів деформації і руйнування матеріалу трубопроводу та подальшої математичної обробки і графічної інтерпретації (рис. 3) запропоновано методичні підходи до прогнозування живучості трубопроводних систем.

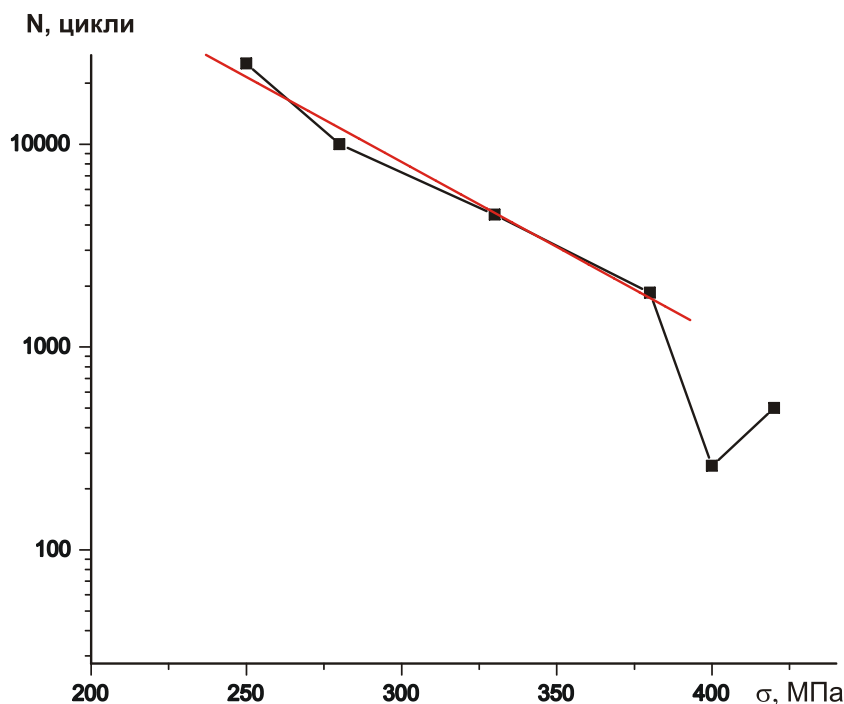


Рисунок 3 – Прогнозування живучості основного металу

Таблиця – Тривалість останньої стадії низькочастотної втоми основного металу трубопроводу

Основний метал	
σ, МПа	живучість, цикли
250	25000
280	10000
330	4500
380	1850
400	260
420	500

Показано, що живучість основного металу в області експлуатаційних та частково екстремальних навантажень (до 380 МПа) досить добре описується математично (рис. 3). Отримана лінійна залежність дає змогу доволі нескладного прогнозування живучості з подальшим використанням результатів в інженерних розрахунках. При цьому похибка методу не перевищує 1-3%.

Щодо високоамплітудної області, то тут вираженої залежності не спостерігається. Очевидно, це пов'язано із зміною механізму деформації, який для текстурованої сталі трубопроводу припадає саме на цю зону. Прогнозування живучості та залишкового ресурсу безпечної експлуатації тут виглядає проблематичним. Експлуатаційні ж ризики будуть надзвичайно високі та, очевидно, неприйнятні. При попаданні трубопроводу у такий режим навантаження необхідно вживати невідкладних заходів для його виведення хоча б у зону прогнозованої деформації (до 380 МПа) для проведення термінових ремонтних робіт. Але головне завдання – ще на стадії проектування, скориставшись

одержаними результатами, коректно оцінити експлуатаційні ризики, побудувати дерево відмов та дерево наслідків і розробити для кожної позаштатної ситуації комплекс заходів з мінімізації ризиків та зведення їх до прийнятних.

Окрему увагу слід приділити удосконаленню існуючої нормативної бази, введенню нових спеціалізованих критеріїв, параметрів та коефіцієнтів для урахування впливу текстури основного металу, негармонійності та нерівномірності експлуатаційних навантажень тощо.

На черзі удосконалення запропонованих підходів і приведення їх до завершеної інженерної методики, яка дасть змогу вносити корективи в режими роботи діючих трубопроводів, способи їх розрахунку та забезпечити якісно новий рівень безпеки на всіх стадіях від проектування до експлуатації. Окремо слід виділити задачу прогнозування перебігу не лише втомних процесів а й складніших корозійно-втомних процесів із визначенням параметрів живучості в корозійно активних середовищах (морська вода, ґрунтові електроліти тощо).

### Висновки

Підвищення якості аналізу ризику відмов трубопроводів, які експлуатуються у важких умовах – важливий чинник забезпечення екологічної безпеки.

Найважна нормативна база вимагає істотного удосконалення шляхом введення додаткових спеціалізованих критеріїв, які дадуть змогу краще оцінити експлуатаційний стан трубопровода.

Впровадження запропонованих підходів дасть змогу коректніше прогнозувати живучість морських трубопроводів та запобігати аваріям і відмовам.

Потрібно розробити підходи для аналітичного опису та прогнозування перебігу корозійно-втомних процесів, визначити параметри, які характеризують корозійну дію середовища і дадуть змогу оцінки живучості та експлуатаційних ризиків.

### Література

1 Морские трубопроводы / Горяинов Ю.А., Федоров А.С., Васильев Г.Г. и др. – М.: Недра, 2001. – 131 с.

2 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафт. і газова пром-сть. – 2002. – № 5. – С. 33-38.

3 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологія дослідження деформації та руйнування трубопроводних систем // Матеріали III міжнародної конференції „Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів, 2004. – С. 419-424

4 Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Деформаційна поведінка сталі трубопроводу при низькочастотній втомі // Зб. наук. праць IV Міжнародного симпозіуму „ASTF-2002”. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 296-300.

УДК 622.692.4+628.143

## МЕТОДИКА ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЬОВОГО МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ ДЛЯ ВІДКАЧУВАННЯ ОСАДОВИХ ВОД ПРИРОДНИХ ТА ШТУЧНИХ ВОДОЙМИЩ

Є.І Крижанівський, Ю.В.Вязніцев

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 502507  
e-mail kvr@nuing.edu.ua

*Представлена оригинальная методика гидравлического расчета полевого магистрального трубопровода для сброса самотеком воды по пересеченной местности. Особенностью методики является то, что кроме критических точек профиля трассы трубопровода, она учитывает все существующие в трубопроводе местные сопротивления и определяет подачу, при которой обеспечивается сброс воды самотеком без разрыва ее струи.*

*The original method of hydraulic self flow cross-country field pipeline calculation is represented. The special point of this method is taking into account the type of pipeline route and all local resistances present in the pipeline.*

Внаслідок надмірних опадів у 2005 році і танення снігів в Івано-Франківській області, на полігоні твердих побутових відходів (ТПВ) с. Рибне Тисменицького району чеки (земляні споруди об'ємом 16-18 тис.м<sup>3</sup>, які були підготовлені для захоронення ТПВ) переповнились фільтратом (осадовими водами, що просочилися через ТПВ), загальним об'ємом понад 50 тис. м<sup>3</sup>.

З метою запобігання вилування фільтрату з чеків було прийнято оперативне рішення про нагортання ґрунту для збільшення висоти обвалування чеків на 1 м. Це рішення було прийнято у максимально стислі терміни у зв'язку із загрозливою ситуацією, що виникла. На проведення дослідницьких робіт та розрахунків щодо міцності обвалування (дамби), практично не було достатнього часу. Тому при нагортанні ґрунту для збільшення висоти обвалування чеків було прийнято рішення дотримуватись, в основному, проектної ширини обвалування в його верхній точці. Роботи з обвалування розпочались на початку квітня та завершилися у другій половині травня.

Перед цим спорожнення чеків від фільтрату, яке було завершено у другій половині листопада, проводилось у 2001 році. Практично, накопичення фільтрату в чеках відбувалося впродовж 3-х років та 6 місяців. Тоді, провівши розрахунки з врахуванням періоду накопичення фільтрату (початок листопада 2001 року – кінець травня 2005 року, або 877 робочих днів), можна зробити висновок, що для того, щоб тільки призупинити природне поповнення фільтрату, необхідно протягом кожного робочого дня вивозити (із застосуванням асенізаційних машин) в середньому 57 м<sup>3</sup> фільтрату.

Для вивезення фільтрату впродовж 6-ти місяців (із врахуванням природного притоку за рахунок осадових вод) необхідно було б вивозити кожного робочого дня не менше 400 м<sup>3</sup> фільтрату. Проведення даних заходів вимагало б залучення відповідних коштів, яких Івано-Франківська міська адміністрація не мала на той час у необхідній кількості.

З метою вирішення питання щодо спорожнення чеків від фільтрату та у зв'язку із загро-