

Секція: Технічні науки

НОВІКОВ АНДРІЙ ІГОРОВИЧ

к.т.н. відділу втоми та термовтоми матеріалів

Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

м. Київ, Україна

ЛУК’ЯНЕНКО КОСТЯНТИН МИХАЙЛОВИЧ

студент НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

м. Київ, Україна

ЯСКОВЕЦЬ ЗАХАР СЕРГІЙОВИЧ

аспірант відділу фізичних основ міцності

Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

м. Київ, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ВИКОНАННІ ВНУТРІШНЬОТРУБНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Газотранспортна система України налічує близько 950 надземних переходів магістральних газопроводів (НПМГ) через природні та техногенні перепони, що є потенційно небезпечними зонами. Одною з нагальних проблеми, які зараз стоять перед газотранспортною промисловістю України, полягають в обстеженні НПМГ на предмет можливості їх експлуатації та продовження їх ресурсу. Оскільки більшість НПМГ в газотранспортній промисловості України побудована 30-50 років тому, то на даний момент реальний технічний стан цих елементів потребує проведення оцінки і визначення надійності та ресурсу їх подальшої експлуатації. НПМГ експлуатуються, з одного боку, з високим рівнем навантаження, а з іншого боку, з досить тривалим терміном використання, який вимірюється десятками років. За цей час матеріали труб, опор та

опорних конструкцій зазнають періодичного або постійного впливу різних силових факторів. Всі ці навантаження призводять до зміни геометрії НПМГ, а, відповідно, і до зміни напружено-деформованого стану (НДС), який відображається на технічному стані переходу, і на його надійності.

Проходження внутрішньотрубного поршня (ВТП) через НПМГ є динамічним явищем, оскільки навантаження (вага поршня) в різні моменти часу прикладається до різних точок повітряного переходу. Це може викликати коливання НПМГ та, відповідно, накладання зусиль та моментів в трубопроводі від коливань на зусилля, зумовлені прикладанням статичної ваги поршня. Тому просте статичне прикладання ваги ВТП в різних точках НПМГ може дати занижені результати розрахунків.

Для проведення повноцінних розрахунків зусиль та напружень в трубопроводі під час проходження ВТП проведено динамічний аналіз цього процесу. В основі проведення таких розрахунків лежить вираз для динамічної рівноваги елементарної ділянки трубопроводу:

$$EJ \cdot \ddot{W}''''(x, t) + \rho F \cdot \ddot{W}(x, t) = \bar{P}(x, t) \quad (1)$$

Тут E - модуль Юнга, J - момент інерції перерізу, ρ - усереднена щільність матеріалу труби, F - площа перерізу металу труби, $\ddot{W}(x, t)$ - переміщення даного перерізу у векторній формі, що залежить від поздовжньої координати x та часової t , $\bar{P}(x, t)$ - змінна з часом зовнішня сила (вага поршня, що переміщується по трубі та відцентрова сила, з якою поршень діє на трубу під час проходження згинів) у векторній формі.

В даній роботі для проведення динамічних розрахунків використано метод гармонічного аналізу. Він полягає в пошуку декількох власних форм та частот коливань, розв'язку динамічної задачі для кожної власної частоти окремо та в подальшому алгебраїчному додаванні результатів для всіх власних частот, що розглядаються. Це дозволяє представити розв'язок для кожної власної частоти у вигляді

$$\bar{W}_i(x,t) = \bar{W}_i(x)A_i(t) \quad (2)$$

де i – номер власної частоти коливань, що розглядається, $\bar{W}_i(x)$ - власна форма коливань, $A_i(t)$ - динамічний коефіцієнт, що характеризує відхилення трубопроводу в момент часу t . Таким чином, залежність для переміщень точок трубопроводу розділяється на дві незалежні компоненти, одна з яких залежить від координати точки, інша – від часу. Після перетворень для i -тої власної частоти можна записати наступний вираз для $A_i(t)$:

$$\ddot{A}_i(t) + A_i(t)\omega_i^2 = \frac{1}{M_i} \int_0^L (\bar{P}(x,t), \bar{W}_i(x)) dx \quad (3)$$

тут ω_i -кругова власна частота, L – загальна довжина трубопроводу,

$M_i = \int_0^L \rho F \cdot (W_{xi}^2(x) + W_{yi}^2(x) + W_{zi}^2(x)) dx$ - узагальнена маса трубопроводу для

даної частоти коливань, $(\bar{P}(x,t), \bar{W}(x)) = P_x(x,t)W_{xi}(x) + P_y(x,t)W_{yi}(x) + P_z(x,t)W_{zi}(x)$

- скалярних добуток сили та власної форми коливань (переміщення в трьох напрямках) в точці. Зазначимо, що для нашого випадку, де в кожен момент часу t сила прикладається лише в одній точці трубопроводу, інтеграл (3) можна переписати як добуток сили на форму коливань в точці x_t , де буде знаходитися поршень в момент часу t , тобто

$$\frac{1}{M_i} \int_0^L (\bar{P}(x,t), \bar{W}_i(x)) dx = \frac{1}{M_i} (\bar{P}(x_t, t), \bar{W}_i(x_t)).$$

У випадку рівномірного руху поршня можна записати наступний вираз: $x_t = t \cdot V$, де V - швидкість поршня.

Розв'язок (3) знаходиться за допомогою інтегралу Дюамеля:

Розв'язок (3) знаходиться за допомогою інтегралу Дюамеля:

$$A_i(t) = \frac{1}{\omega_i \cdot M_i} \int_0^t (\bar{P}(x_\tau, \tau), \bar{W}_i(x)) \sin \omega_i(t - \tau) d\tau \quad (4)$$

Зазначимо, що більшість НПМГ, що розглядаються, є досить довгими об'єктами (довжина сягає 1000 м.). Снаряд проходить по таким

переходам протягом 3-х хвилин. Згідно формул (3), (4) на динамічну поведінку та напруження у певній точці переходу навантаження від поршня впливають в однаковій мірі, незалежно від його поточного місця знаходження на переході. Проте, насправді, через тертя на опорах, втрати енергії в трубі, тощо, має місце затухання коливань, тобто, на поведінку трубопроводу в певній точці проходження поршня по віддаленим частинам переходу впливає в меншій мірі, ніж по наближеним до точки. Окрім того, втрати енергії призводить до того, що сумарні переміщення та напруження в переході є меншими за обчислені згідно формул (3)-(4).

Врахування втрат енергії, затухання коливань для складних об'єктів на зразок повітряних переходів є досить складною та неоднозначною задачею, оскільки затухання залежить від багатьох факторів (стан опор, демпфування в матеріалі, ізоляції, середовищі, що транспортується, тощо). Як правило, використовують коефіцієнт затухання коливань, спільний для всієї споруди, причому часто його не вимірюють, а призначають для споруди на основі Стандартів та інших нормативних документів. Нижче представлено модифікації виразів (3) та (4) для врахування безрозмірного коефіцієнту затухання ζ . Таким чином, шляхом незначної зміни розрахункової процедури, враховано затухання коливань

$$\ddot{A}_i(t) + 2\zeta\omega_i \dot{A}_i(t) + A_i(t)\omega_i^2 = \frac{1}{M_i} \int_0^L (\bar{P}(x,t), \bar{W}_i(x)) dx, \quad (5)$$

$$A_i(t) = \frac{1}{\omega_i^d \cdot M_i} \int_0^t (\bar{P}(x_\tau, \tau), \bar{W}_i(x_\tau)) e^{-\zeta\omega_i(t-\tau)} \sin \omega_i^d(t-\tau) d\tau, \quad (6)$$

де $\omega_i^d = \omega_i \sqrt{1-\zeta^2}$ - власна частота коливань з врахуванням її зміни від демпфування (затухання).

Вектор сил $\bar{P}(x_i, t)$ задається наступним чином: якщо місце розташування поршня в поточний момент часу x_i відповідає прямій ділянці, то в ньому діє лише вага поршня у вертикальному напрямку:

$P_Y = -gm_p$, дві інші компоненти дорівнюють 0. Тут $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння, m_p - маса поршня.

Якщо поршень рухається по згину, то в місці розташування поршня додатково діє відцентрова сила інерції $P_{vc} = \frac{V^2}{B_0} m_p$, де V - швидкість поршня, B_0 - радіус кривизни згину. Отже, вирази для компонент сили будуть наступними: $P_X = -I_X P_{vc}$, $P_Y = -I_Y P_{vc} - gm_p$, $P_Z = -I_Z P_{vc}$, де I_X, I_Y, I_Z - компоненти одиничного нормального вектора до центральної осі згина (фактично вони задають напрямок відцентрової сили).

Розрахунок можливості виконання внутрішньотрубної діагностики з використанням поршня проводяться для функціонуючого НПМГ «Союз» на переході через р. Ворскла (км 1626.0), що належить Кременчуцькому ЛВУМГ УМГ Черкаситрансгаз (Полтавська обл., м. Кобеляки). При розрахунку використовувались наступні параметри ВТП: швидкість – 5 м/с, маса – 7600 кг. Надземний перехід являє собою прямолінійний трубопровід $D_y 1420\text{мм} \times 19.5 \text{ мм}$ (мінімальна товщина стінки трубопроводу - 19.3мм) з відводами та складається з ділянки довжиною 385.5 м, двох Г-подібних компенсаторів на вході та виході трубопроводу з ґрунту та виконаний на 8 опорах. Робочий тиск – до 7,4 МПа. Перехід побудований у 1978 році.

На рис. 1 зображено візуалізацію еквівалентних напружень моделі НПМГ для робочого режиму навантаження.

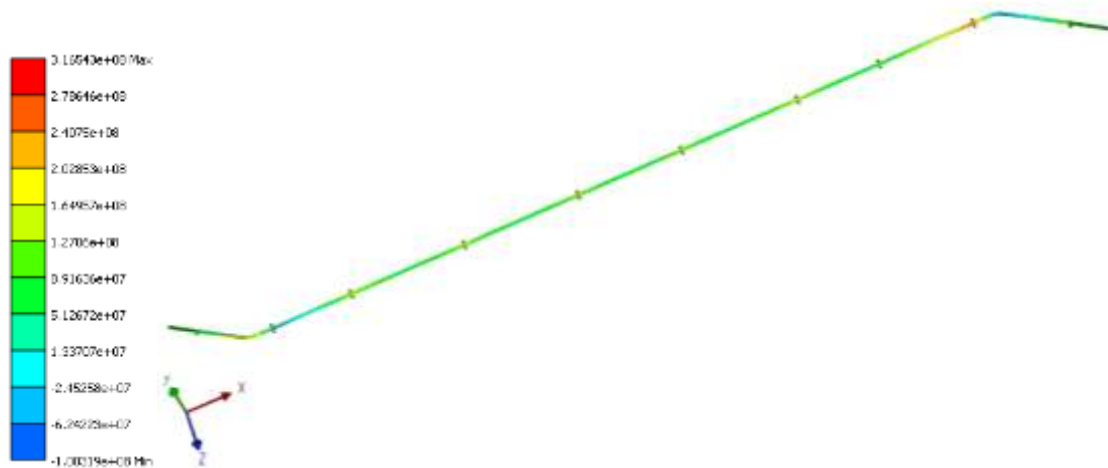


Рис. 1 – Результати розрахунку еквівалентних напружень для робочого режиму навантаження НПМГ «Союз»

Для даного НПМГ в табл. 1. представлені значення власних частот коливань в Гц залежно від напрямку коливань.

Таблиця 1 - Власні частоти коливань повітряного переходу, Гц

№	Напрямок Y (вертикальний)	Напрямок XZ (горизонтальний)
1	8.86278	5.6175
2	10.44955	8.99888
3	12.10033	10.66398
4	12.53171	10.77368

Для демонстрації методики представлено графіки параметру $A_i(t)$ для частот по Y напрямку та частот по XZ напрямку (рис. 2) та зміни згинаючих моментів M_y та M_z посередині НПМГ в залежності від часу (рис. 3).

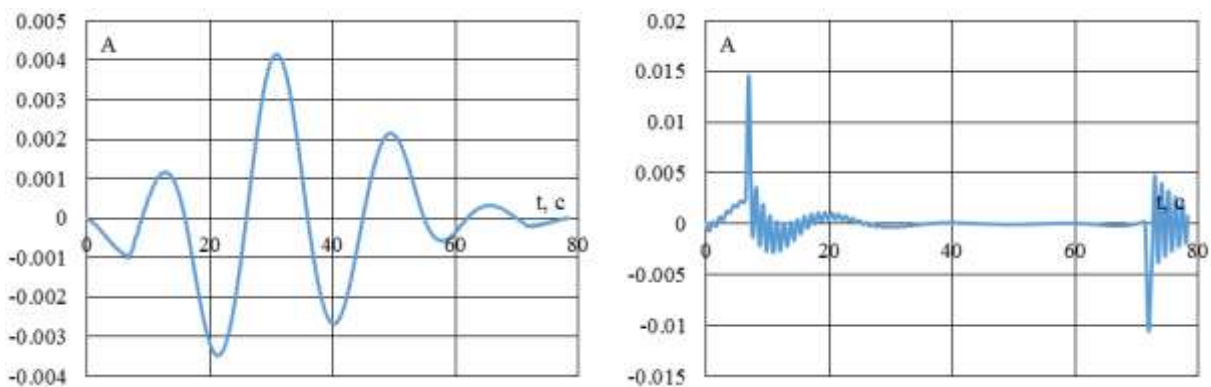


Рис. 2 – Параметр $A_i(t)$ для першої частоти по Y та Z напрямку

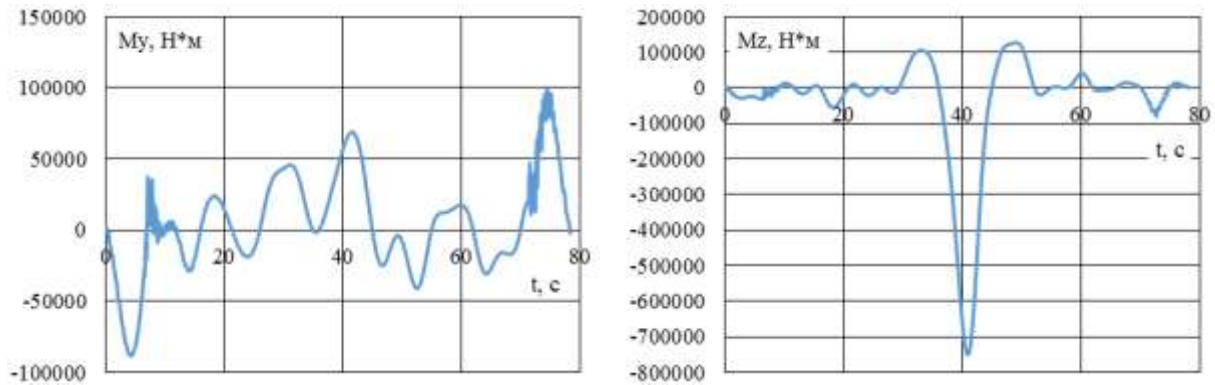


Рис. 3 – Згинаючий момент M_y та M_z в залежності від часу

Екстремуми графіків, що відповідають коливанням у вертикальному напрямку, відповідають проходженню поршнем середин прольотів між опорами. Це свідчить про те, що результати моделювання є в цілому коректними та фізично обґрунтованими.