

ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВИСЯЧИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ЗМІНАХ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Є. Й. Рінецький, Р. Й. Рінецький, О. Ю. Коробков

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: olehkorobkov@gmail.com

Запропоновано комплексну модель прогнозування напружено-деформованого стану висячих газопроводів при змінах зовнішнього навантаження, яка дозволяє виявляти екстремальні умови експлуатації газопроводу і уникнути негативних наслідків перевантаження. Розробку моделі прогнозування здійснено на позиціях системного підходу і представлено у вигляді двох систем "газопровід" і "канатна підвіска", між якими існують зв'язки, що відображають суть процесу зусилля-деформація. Відмічено особливість деформаційних процесів канатної підвіски, які визначаються відносним навантаженням. Розв'язана задача із визначенням положення статичної рівноваги системи "газопровід – канатна підвіска" на основі принципу мінімуму потенціальної енергії. Для положення статичної рівноваги сформовано умову узгодженості переміщень точок кріплення канатної підвіски до твірної газопроводу, яка використовується як критерій пошуку невідомих силових факторів. Модель побудована за принципом "пошук рішення", де в межах заданого факторного простору величин зусиль в утримуючих канатах вибирається їх оптимальна комбінація, котра задовольняє сформованому критерію. За результатом математичного моделювання зроблено прогнозовану оцінку перерозподілу зусиль в канатній системі в залежності від зміни діючого на газопровід навантаження q . Так, зі збільшенням навантаження спостерігається зростання зусиль в крайніх канатах дещо вищими темпами, ніж для середнього. Перерозподіл величини зусиль в канатній підвісці залежить від її геометрії і податливості газопроводу і знаходиться в межах 10 %.

Ключові слова: висячий газопровід, прогнозування, напружено-деформований стан, зовнішнє навантаження, математичне моделювання.

A comprehensive model for predicting the stress-strain state of hanging gas pipelines with changes in external load is proposed, which allows the detecting of extreme conditions of gas pipeline operation and avoiding the negative consequences of overloading. The development of the forecasting model was carried out based on a systemic approach and is presented in the form of a "gas pipeline" and a "rope suspension", between which there are connections that reflect the essence of the force-deformation process. The peculiarity of the deformation processes of the rope suspension, which is determined by the relative load, is noted. The problem of determining the position of static equilibrium of the "pipeline – rope suspension" system based on the principle of minimum potential energy is solved. For the position of static equilibrium, the condition of equality of movements of the points of attachment of the rope suspension to the generating gas pipeline is formed, which is used as a criterion for finding unknown force factors. The model is built according to the principle of "Finding a solution", when within the given factor space of force values in the retaining ropes, their optimal combination is selected, which satisfies the established criterion. Based on the result of mathematical modeling, a predictive assessment of the redistribution of forces in the rope system was made depending on the change in the load q acting on the gas pipeline. Thus, with an increase in the load, there is an increase in effort in the extreme ropes at somewhat higher rates than for the average. The redistribution of forces in rope suspensions is within 10 %.

Key words: hanging gas pipes, prediction, stress-deformed state, external load, mathematical modeling.

Вступ

Неодноразово підкреслювалось, що ділянки надземних переходів трубопроводів, до яких відносяться й висячі газопроводи, є досить унікальними спорудами і вимагають підвищеної уваги з боку експлуатаційних служб [1, 2]. Відкриті ділянки газопроводу безпосередньо контактують з природним зовнішнім середовищем, яке схильне до коливань погодних умов і виникненням різноманітних природних ситуацій. Дії

природного середовища на відкриті ділянки надземного переходу викликають не тільки негативні явища у вигляді корозії металу газопроводу з подальшою зміною його структури, а й, головне, призводить до появи додаткових силових факторів зовнішнього навантаження та перерозподілу зусиль у несучих елементах конструкції.

Власне зміни у зовнішньому навантаженні, такі як зледеніння поверхні трубопроводу у зи-

мовий період, температурні коливання, вітрове навантаження, зміни тиску газу тощо, викликають додаткові деформації газопроводу і змінюють його загальний НДС.

Особливістю висячих газопроводів є те, що крім нерухомих опор газопровід додатково втримується системою канатів. Канатна підвіска разом з нерухомими опорами підтримує газопровід у підвішеному стані, сприймаючи силові зусилля, і прагне зайняти положення статичної рівноваги.

Зміни величин силових факторів зовнішнього навантаження призводять до додаткових деформацій газопроводу, а ті, в свою чергу, викликають й переміщення канатної підвіски, що веде до перерозподілу зусиль і перехід до нового стійкого стану статичної рівноваги. Новий стійкий стан відповідає новому режиму НДС газопроводу.

Таким чином, висячий газопровід утворює складну систему “газопровід–канатна підвіска”, яка в силу своєї гнучкості достатньо чутливо реагує на зміни зовнішніх силових факторів навантаження. Перехід від одного стійкого стану до іншого супроводжується зміною НДС газопроводу. В таких випадках складно говорити про прогнозування НДС висячих газопроводів при змінах зовнішнього навантаження, так як невідомим залишається нове положення статичної рівноваги.

Існуючі методи контролю можуть дати оцінку реальному стану НДС газопроводу на момент обстеження. Однак, щоб спрогнозувати поведінку системи, а тим більше оцінити НДС при змінах зовнішнього факторів середовища, методи потребують теоретичних доробок, які надали б опис поведінки системи “газопровід–канатна підвіска”.

Розроблення методів прогнозування напружено-деформованого стану висячих газопроводів при змінах зовнішнього навантаження дозволить виявляти екстремальні умови експлуатації газопроводу і уникнути негативних наслідків перевантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Однією із характерних робіт стосовно дослідження НДС газопроводів на надземному переході з виходом на прогнозовані показники слід вважати публікацію [1]. В даній публікації описано комплексний підхід до оцінки технічного стану переходів магістральних газопроводів (МГ) балкового типу.

Вихідними даними для розрахунків є результати геодезичних обстежень. НДС газопроводу оцінюють за такою схемою. Спочатку від-

бувається етап геодезичного контролю просторового положення трубопроводу на опорах. Далі на основі отриманих координат методом сплайн-апроксимації отримується рівняння деформованої осі трубопроводу. Такий підхід дозволяє авторам розглядати процес деформації трубопроводу відповідно до фізичних законів.

Розрахунки НДС ведуться за величинами відхилень осі трубопроводу від початкового положення під час його довготривалої експлуатації. Для вхідних показників автори статті визначили межі варіювання, які були встановлені за статистичними даними спостережень. В результаті було отримано показники НДС для різних варіантів силового навантаження.

Отримані результати комплексних обстежень у сукупності з показниками НДС дозволили авторам провести розрахунки на міцність і здійснити оцінку залишкового ресурсу ділянки надземного переходу МГ.

В наступній публікації проаналізовано НДС повітряного переходу вантової споруди через р. Дністер [2]. За своєю конструкцією вантові надземні переходи газопроводів мають більшу схожість з повітряними переходами, тільки додатковими утримуючими елементами тут виступають ванти – металічні конструкції у вигляді штанг. За початкові дані взято результати інструментальної зйомки, які вказали на наявність великих зміщень труби в зоні надземного переходу.

Автори статті шляхом моделювання визначають різні рівні напруження в газопроводі у випадках збільшення навантаження на 25 тс і 50 тс. Здійснено порівняння значень напружень у початковому стані і при збільшенні навантаження. Відмічено, що в початковому положенні напруження знаходяться в межах допустимих, а зі збільшенням зовнішнього навантаження вони зростають і можуть сягнути рівня пластичних деформацій. Авторами пропонується ряд заходів для недопущення явищ пластичних деформацій, при яких втрачається міцність газопроводу.

Таким чином, з розглянутих публікацій видно, що задача прогнозування НДС газопроводів на надземному переході пов'язана з моделюванням фізичних процесів, що відбуваються при змінах зовнішнього навантаження.

Конструкції висячих газопроводів відрізняються від вантових кріплень тим, що гнучка система канатів не забезпечує лінійність зв'язку між переміщенням та прикладеними зусиллями до канату з боку трубопроводу.

Серед робіт, спрямованих на визначення прогнозованих показників, слід згадати досяг-

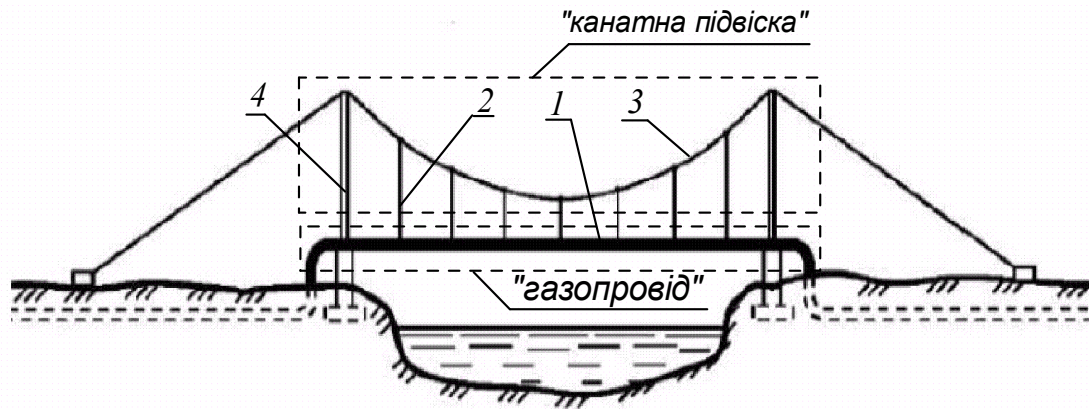


Рисунок 1 – Конструктивна схема висячого газопроводу

нення в галузі досліджень НДС газопроводів підземного залягання [3, 4]. Автори відмітили, що задача прогнозування НДС газопроводів полягає у визначенні змін внутрішніх напружень під впливом різних силових факторів, значення яких варіюється на підставі реальних умов експлуатації. Особливістю їх розрахунків є врахування сили дії ґрунту на газопровід. В своїх дослідженнях автори розробили факторну модель оцінки НДС газопроводу в динаміці. Це дозволило встановити залежність зміни напружень в газопроводі від коливання тиску і отримати прогнозовані показники ресурсу газопроводу. В результаті отримано складові внутрішніх напружень нормальної та повздовжньої дії [3, 4].

Висячі газопроводи мають зовсім інший характер силового навантаження. За умовами експлуатації висячого газопроводу можна виявити складні взаємозв'язки між самим газопроводом і канатною підвіскою. В той час існуючі підходи здійснюють подання об'єктів індивідуально.

Аналіз спеціалізованої технічної літератури показав, проблема прогнозування напружено-деформованого стану висячих газопроводів залишається відкритою. Це, насамперед, питання на позиціях системного підходу – подання не окремих об'єктів, а системи взаємопов'язаних елементів [5].

Постановка завдання

Прогнозування напружено-деформованого стану необхідно почати з розрахункової схеми, яка має бути отримана на основі прийнятих спрощень конструкції газопроводу та умов його навантаження. Так, гнучкі висячі схеми представляють собою конструкцію, в якій, газопровід – 1 за допомогою підвісок – 2 кріпиться до основного несучого канату – 3, що перекидається через пілони – 4 (рис. 1).

Загальним методом оцінки напружено-деформованого стану надземних переходів вважається розрахункова схема, в якій трубопровід розглядається як нерозрізна багатопрогінна балка, яка опирається в прогоні на пружно-піддатливі опори [6]. Тоді завданням такого підходу є отримання коефіцієнтів жорсткості пружно-піддатливих опор. Реалізуючи матричний метод розрахунку пружних стрижневих систем, знаходять шукані прогини трубопроводу і виникаючі внутрішні силові фактори (згинальні моменти та реакції пружно-піддатливих опор).

Канатна підвіска має свої особливості, чим і відрізняється від стрижневих систем. По-перше, канати працюють тільки на розтяг. По-друге, відсутня лінійна залежність між величинами деформацій і переміщеннями точок її кріплення до трубопроводу.

Таким чином, маємо суперечність: канатна підвіска – гнучка система, схильна до коливань, що не підпорядковується лінійному закону. Як будь-яка коливна система, канатна підвіска має свій стійкий стан для кожного з режимів навантаження. Крім того, її потенціальна енергія визначається виключено гравітаційними силами.

Пошук такого положення статичної рівноваги для різних режимів навантаження канатної підвіски дозволить розв'язати задачу “зусилля-переміщення”.

Розв'язування задачі базується на принципах системного підходу “газопровід–канатна підвіска”, де окремі елементи виступають як єдине ціле (рис. 1). В межах системи “канатна підвіска” повинен здійснюватися пошук стійкого стану із визначенням геометричних характеристик. В системі “газопровід” розв'язується традиційна задача знаходження прогинів трубопроводу в характерних точках. І тільки правильно підібраний критерій зв'язку між двома системами дозволить однозначно визначати

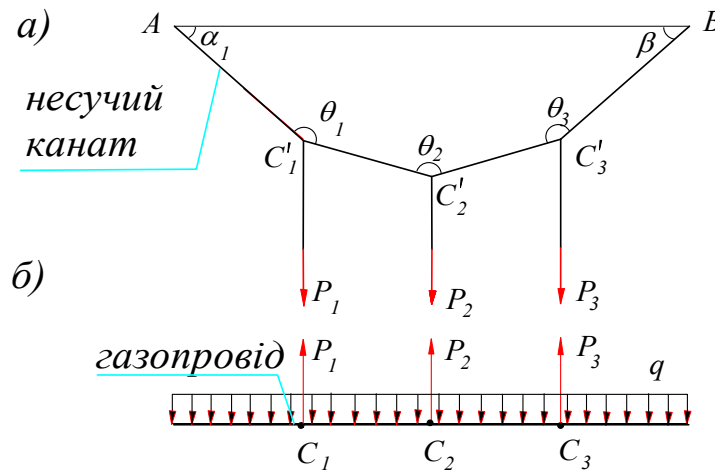


Рисунок 2 – Етап декомпозиції з утворенням зв’язків між системами “канатна підвіска” (а) і “газопровід” (б)

стан статичної рівноваги конструкції при різних значеннях силових факторів, що відкриває можливість здійснювати прогнозування НДС всякого газопроводу.

Мета дослідження полягає у прогнозуванні напружено-деформованого стану всякого газопроводу при змінах зовнішнього навантаження як єдиної системи “газопровід – канатна підвіска” за принципом системного підходу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Прогнозування НДС всякого газопроводу стане можливим у випадку, якщо будуть отримані аналітичні залежності силової поведінки канатної підвіски. Для цього скористаємося принципами системного підходу і відокремимо “газопровід” і “канатну підвіску” [5], встановивши між двома системами зв’язки двох типів – прямий і зворотній. Прямим зв’язком виступають діючі навантаження у вигляді зусиль P_1 , P_2 , P_3 зі сторони газопроводу на канатну систему. Зворотним зв’язком будуть прогини газопроводу, і тотожно до них величини переміщень кріплень утримуючих канатів.

Розглянемо спрощену конструкцію всякого переходу газопроводу з трьома утримуючими канатами. Відкинемо канати, а їх дію замінимо зосередженими зусиллями P_1 , P_2 , P_3 , які прикладені до твірної поверхні трубопроводу в точках C_1 , C_2 , C_3 і до несучого канату в точках C'_1 , C'_2 , C'_3 (рис. 2). Між двома системами “газопровід” і “канатна підвіска” виникає зворотний зв’язок “деформація труби – переміщення канатної підвіски – зусилля в канатній підвісці – деформація труби”.

Процес взаємодії двох систем виглядає таким чином. При зміні зовнішнього навантаження на газопровід Δq система з одного стійкого

стану, якому відповідає потенціальна енергія U_0 , переходить в новий стан статичної рівноваги. При цьому величини зусиль отримують прирости ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 , відповідно отримують прирости і переміщення (або прогини газопроводу) у вигляді Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 . В новому положенні потенціальна енергія отримує приріст ΔU , а її значення становитиме:

$$U_1 = U_0 + \Delta U.$$

Для того, щоб отримати аналітичний опис переходу канатної системи з одного стійкого стану в інший, розглянемо її геометрію і кінематику на прикладі розрахункової схеми (рис. 3). Силове навантаження підвісок імітовано дією дискретних мас m_1 , m_2 , m_3 , які прикладені до точок кріплення підвісок до несучого канату C'_1 , C'_2 , C'_3 . Такий підхід обґрунтовано тим, що, по-перше, зусилля в канатах мають гравітаційне походження, а, по-друге, це дозволить отримати відносно простий вираз для розрахунку потенціальної енергії системи.

Подальше перетворення гуртуються на прийнятих припущеннях:

- форму несучого канату, яка має наближений вигляд гнучкої нитки, апроксимовано ламаною лінією, а самі ділянки між підвісками подано прямими відрізками;

- переміщення канатної підвіски пов’язано тільки зі зміною її кутів, в той час як ланки канатів вважаються недеформованими;

- вузли з’єднання відрізків ламаної лінії і підвісок подано у вигляді шарнірів, що дозволяє взаємне переміщення ділянок канату зі зміною внутрішніх кутів θ_i .

Ці припущення дозволили розглядати канатну підвіску у вигляді шарнірного п’ятиланкового механізму з двома ступенями вільності. Таким чином, несучий канат пере-

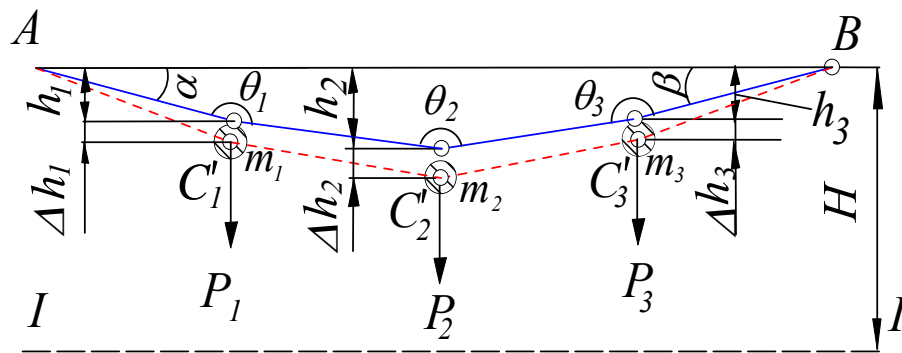


Рисунок 3 – Геометричні параметри канатної підвіски при зміні положення стійкого стану

творено у чотири рухомі прямолінійні ланки AC_1 , C_1C_2 , C_2C_3 , C_3B з відповідними довжинами l_1 , l_2 , l_3 і l_4 , що з'єднані між собою шарнірами. Положення такого механізму визначають двома горизонтальними кутами орієнтації крайніх ланок α і β . Внутрішні кути між ланками θ_i визначаються геометричними параметрами канатної підвіски та залежать від її положення.

Задача пошуку положення статичної рівноваги сформульована так: канатна підвіска утримує три зосереджені маси. Потрібно визначити положення канатної підвіски, а саме, кути α і β , в яких потенціальна енергія від зосереджених мас буде мінімальною.

Якщо зусилля P_1 , P_2 , P_3 в точках кріплення підвіски до трубопроводу будуть імітуватися дією зосереджених мас m_1 , m_2 , m_3 , вираз потенціальної енергії для умови стану статичної рівноваги запишеться у вигляді

$$U = \sum_{i=1}^3 P_i (H - h_i) = \sum_{i=1}^3 m_i g (H - h_i) \rightarrow \min. (1)$$

З формули (1) неважко помітити, що стан станичної рівноваги залежатиме не від абсолютних значень сил, а від їх співвідношення. Іншими словами, якщо канатна підвіска знаходиться у рівновазі під дією трьох сил, які позначають як P_1 , P_2 , P_3 , то такий самий стан рівноваги буде спостерігатися і при силових навантаженнях $n \cdot P_1$, $n \cdot P_2$, $n \cdot P_3$, де n -масштабний коефіцієнт.

Введемо безрозмірні коефіцієнти навантаження. Перший канат навантажується безрозмірною силою $k_0 = 1$, а два інших – $k_1 = \frac{P_2}{P_1}$ і $k_2 = \frac{P_3}{P_1}$.

Сам факт існування такого стійкого стану, який відповідає мінімуму потенціальної енергії [7], проілюстровано на графіках рис. 4. Тут показано зміни функціоналу потенціальної енергії

(1) для двох випадків симетричного навантаження канатної підвіски, при яких справедлива рівність $k_0 = k_2 = 1$. Тоді функціонали $U_1(\alpha)$ і $U_2(\alpha)$ на проміжку кута α $[0,72...0,75$ рад] мають точки мінімуму зі значеннями $U_{1\min}$ і $U_{2\min}$. Точки точці мінімуму відповідають геометричним параметрам канатної підвіски у стійкому стані.

На основі схеми рис. 3 в результаті імітаційного експерименту для заданого набору дискретних даних відносного навантаження k_0 , k_1 , k_2 було отримано відповідні їм переміщення Δh_i . В подальшому було виявлено кореляційну залежність між двома масивами даних.

Процедура пошуку статичної рівноваги для різних комбінацій силового навантаження k_0 , k_1 , k_2 здійснювалася ітераційним циклом: шляхом наближення кутів α і β до виконання умови (1). Це означало приведення канатної підвіски у стан статичної рівноваги, в якому геометрія підвіски забезпечує мінімум потенціальної енергії. В стані статичної рівноваги за фіксованою геометрією канатної підвіски визначають відповідні їм значення висот h_i .

Алгоритм отримання дискретних масивів даних складається із кількох блоків і був реалізований на мові програмування VBA.

Блок 1. Введемо коефіцієнти безрозмірного силового навантаження. Перший канат навантажується безрозмірною силою $k_0 = 1$, а два

інших – $k_1 = \frac{P_2}{P_1}$ і $k_2 = \frac{P_3}{P_1}$. Задаємо факторний

простір безрозмірного навантаження. Враховуючи реальний діапазон зусиль у канатній підвісці, маємо межі для k_1 : $0,9 < k_1 < 1,1$ і для k_2 : $0,9 < k_2 < 1,1$.

В результаті сформовано різні можливі варіанти силового навантаження на канатну підвіску як комбінацію двох факторів $k_1(I)$ і $k_2(J)$.

Блок 2. Ітераційним циклом здійснюється пошук положення статичної рівноваги, що за-

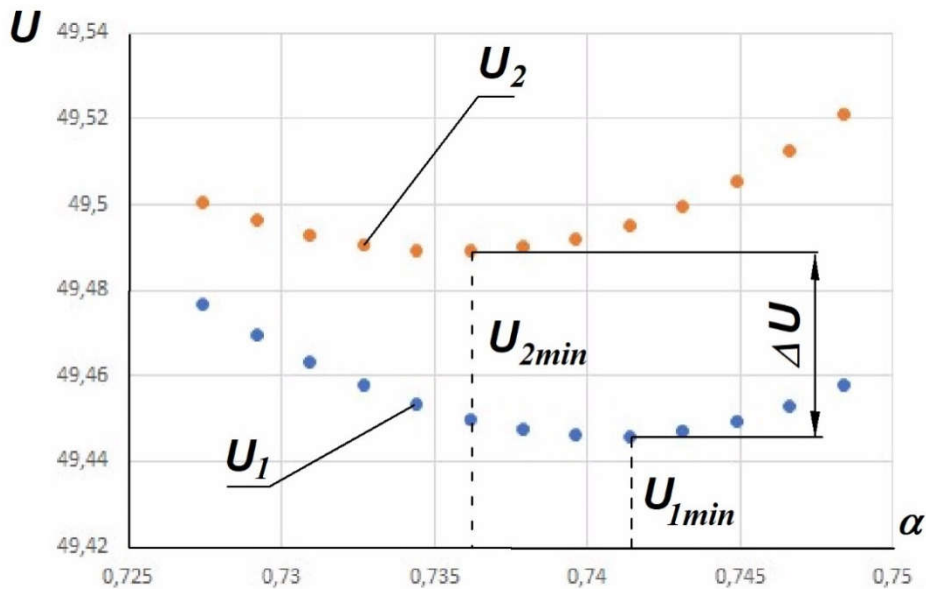


Рисунок 4 – Визначення геометричних характеристик канатної підвіски у стані статичної рівноваги

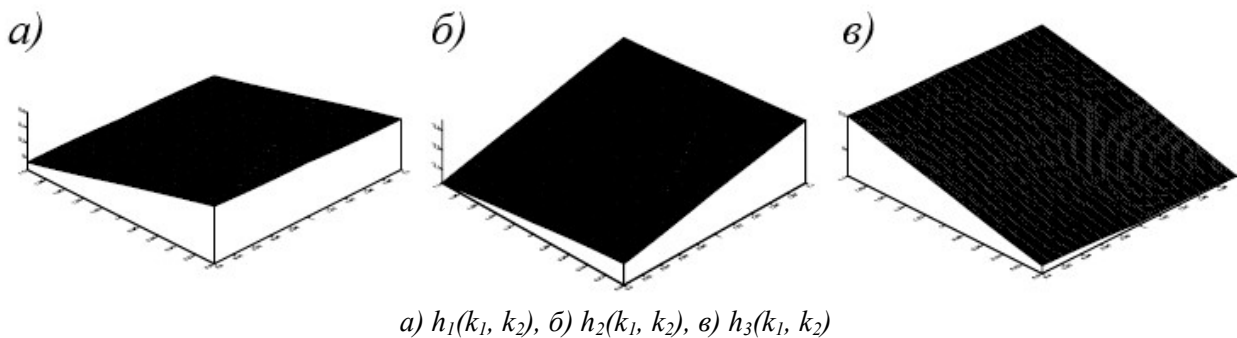


Рисунок 5 – Інтерпольовані поверхні дискретних даних кореляційних масивів з визначенням аналітичних залежностей:

довольняє умові (1) мінімуму потенціальної енергії $U(I, J) = f(\alpha, \beta) \rightarrow U_{\min}(I, J)$. Для кожної групи факторів силового навантаження $k_1(I)$ і $k_2(J)$ знайдено значення кутів α і β , при яких досягнуто значення $U_{\min}(I, J)$.

Блок 3. Здійснюється формування набору дискретних даних для всіх можливих випадків навантаження канатної підвіски. Кінцевим результатом роботи алгоритму є набір дискретних даних у вигляді рядків. Кожен рядок даних містить наступну інформацію: значення відносних навантажень $k_1(I)$ і $k_2(J)$ та відповідні їм значення висот h_i (прирости висот Δh_i).

Інтерпретація отриманих результатів показала наступне. На вибраному факторному просторі між переміщенням точок підвісок C'_1, C'_2, C'_3 і відносними навантаженнями існує кореляційна лінійна залежність. Методами інтерполяції було побудовано три поверхні відгуку для висот h_1, h_2, h_3 в залежності від відносного навантаження (рис. 5).

В результаті проведеної лінеаризації було отримано залежності у вигляді поліномів:

$$h_1 = -0,524 - 3,402k_1 + 3,928k_2;$$

$$h_2 = 1,051 - 0,521k_1 + 0,527k_2;$$

$$h_3 = -0,524 + 3,927k_1 + 3,4238k_2$$

або в приростах

$$\Delta h_1 = h_1 + h_{1\text{ст}};$$

$$\Delta h_2 = h_2 + h_{2\text{ст}}; \quad (2)$$

$$\Delta h_3 = h_3 + h_{3\text{ст}};$$

де $h_{\text{іст}}$ – значення параметра h_i у стані початкової стійкої рівноваги.

Отримані вирази (2) виконують таку ж саму роль зв'язку між навантаженням і переміщенням як і рівняння закону Гука для пружних опор трубопроводів при його згині. Різницею є те, що значення навантажень у формулах (2) записано у відносних величинах.

Таким чином, аналітичні залежності силової поведінки канатної підвіски у сукупності з

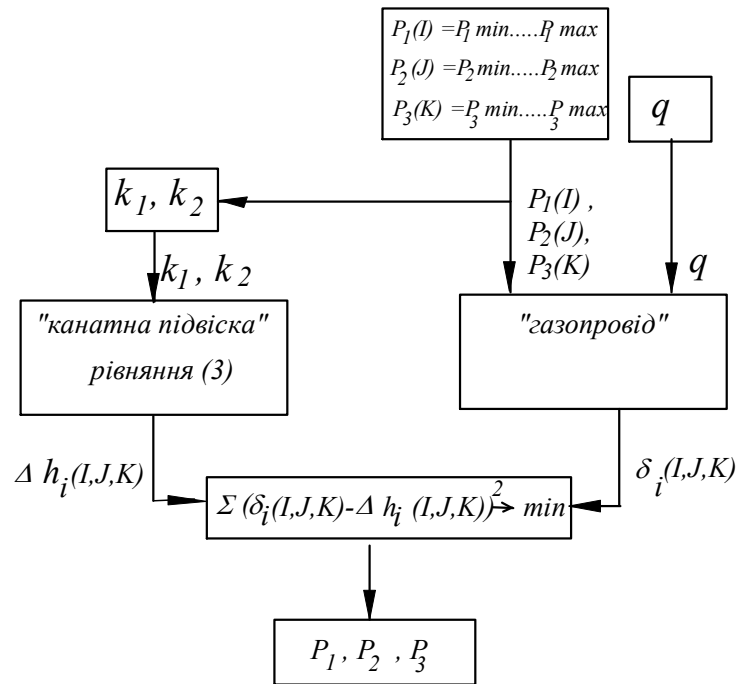


Рисунок 6 – Блок-схема комплексної моделі прогнозування НДС всіячих газопроводів

рівняннями деформації самого газопроводу дозволяють розробити алгоритм у вигляді комплексної моделі силового навантаження всіячого газопроводу для розрахунку та прогнозування його НДС.

Однією з умовою прогнозування є наявність інформації про початкове положення газопроводу. Дану інформацію можна отримати, наприклад, геодезичними методами [1-4]. Подальші розрахунки НДС вже здійснюються з урахуванням відхилення від початкового стану. Власне комплексна модель відображає зміни в НДС газопроводу відносно початкового стану, тому оперує такими величинами, як приріст силового навантаження та відповідні їм природсти переміщень.

Описані принципи лягли в основу створення комплексної моделі силового навантаження газопроводу на канатній підвісці. Призначення моделі - спрогнозувати силове навантаження на газопровід у разі зміни значень його активних сил. Причиною зміни активних сил є коливання значень розподільного навантаження q , яке діє на газопровід. У разі зміни розподільного навантаження Δq відбувається перерозподіл зусиль у підвісках канату, що, в свою чергу, змінює загальний НДС газопроводу.

Комплексна модель прогнозування складається з трьох блоків: "газопровід", "канатна підвіска" і "пошук рішення", між якими існують зв'язки, що відображають фізичну суть процесу (рис. 6). Вхідними величинами буде

силове навантаження q , а також згенерований набір силових зусиль у підвісках P_1, P_2, P_3 . Розподільне навантаження разом із зосередженими силами утворюють різноманітні варіанти силового навантаження системи, що викликає деформації як газопроводу, так і канатної підвіски. Із запропонованих варіантів необхідно буде вибрати один, який відповідає реальному режиму навантаження. Правильний вибір варіанту можливий за умови виконання сформованого критерію.

Ці деформації розраховуються окремо блоками "газопровід" та "канатна підвіска". Різниця у вхідних величинах названих блоків полягає у тому, що блок "газопровід" оперує абсолютними значеннями силових величин, в той час як блок "канатна підвіска" – відповідно до них відносними.

Вихідними величинами названих блоків є два масиви значень. Для блоку "газопровід" це є переміщення характерних перерізів труби $\delta_i(I, J, K)$, а для блока "канатна підвіска" - положення точок кріплення підвісок $\Delta h_i(I, J, K)$.

На основі прийнятих припущень різниця між величинами $\delta_i(I, J, K)$ і $\Delta h_i(I, J, K)$ повинна бути мінімальною в реальних умовах експлуатації. Це пояснюється тим, що точки підвіски C'_1, C'_2, C'_3 і точки на твірній трубопроводу C_1, C_2, C_3 здійснюють свої переміщення синхронно. Виходячи з цього маємо критерій задачі "пошук рішення" для вибору реального варіанту навантаження:

$$\sum_{i=1}^n (\delta_i(I, J, K) - \Delta h_i(I, J, K))^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Результатом роботи комплексної моделі виступає набір значень зусиль у підвісках P_1, P_2, P_3 , які задовольняють умові (3). Практично це означає, що даний набір значень зусиль P_1, P_2, P_3 відповідатиме даному силовому навантаженню q .

Модель дає можливість стежити, як впливає зміна величини інтенсивності навантаження на зусилля в підвісках канату. Дана властивість дозволяє прогнозувати силове навантаження у різних випадках (табл. 1).

Таблиця 1 – Прогнозування зусиль в канатні підвісці у разі зміни навантаження на газопровід

Зміна розподільного навантаження Δq (Н/м ²)		Зусилля в підвісках канату, (Н)		
		P_1	P_2	P_3
початковий стан		8000	8000	8000
прогно- зований	100	9000	8600	9000
	200	10200	9400	10200
	300	12100	10900	12100

За результатом математичного моделювання зроблено прогнозну оцінку перерозподілу зусиль в канатній системі в залежності від зміни діючого на газопровід навантаження q . Так, зі збільшенням навантаження спостерігається зростання зусиль у крайніх канатах дещо вищими темпами, ніж для середнього. Перерозподіл величини зусиль у канатних підвісках знаходиться в межах 10 %.

Висновки

Запропоновано комплексну модель прогнозування напружено-деформованого стану висячих газопроводів при змінах зовнішнього навантаження, яка дозволяє виявляти екстремальні умови експлуатації газопроводу і уникнути негативних наслідків перевантаження.

Розробку моделі прогнозування здійснено на позиціях системного підходу і представлено у вигляді “газопровід” і “канатна підвіска”, між якими існують зв’язки, що відображають суть процесу «зусилля-деформація». Вказано на особливість деформаційних процесів канатної підвіски, які визначаються відносним навантаженням.

Розв’язана задача із визначенням положення статичної рівноваги системи “газопровід-канатна підвіска” за принципом мінімуму потенціальної енергії. Для положення статичної рі-

вноваги сформовано умову узгодженості переміщень точок кріплення канатної підвіски до твірної газопроводу, що використовується як критерій пошуку невідомих силових факторів.

Модель побудована за принципом “пошук рішення”, де в межах заданого факторного простору величин зусиль в утримуючих канатах вибирається їх оптимальна комбінація, котра задовольняє сформованому критерію.

За результатом математичного моделювання зроблено прогнозну оцінку перерозподілу зусиль у канатній системі залежно від зміни діючого на газопровід навантаження q . Так, зі збільшенням навантаження спостерігається зростання зусиль в крайніх канатах дещо вищими темпами, ніж для середнього. Перерозподіл величини зусиль в канатній підвісці залежить від її геометрії та піддатливості газопроводу і знаходиться в межах 10 %.

Література

1. Деркач М.П., Зубик Й.Л., Кичма А.О. Комплексний підхід до оцінки технічного стану переходів магістральних газопроводів балкового типу. *Методи та прилади контролю якості*. 2005. № 15. С.105-108.
2. Банахевич Р.Ю., Крупка В.О., Марчук О.М. Досвід діагностичного обстеження вантового переходу МГ Івацевичі – Долина II н. через ріку Дністер. *Теорія і практика будівництва*. 2011. № 7. С. 24–27.
3. Жовтуля Л.Я., Олійник А.П., Яворський А.В., Карпаш М.О. Розроблення методики оцінки напружено-деформованого стану лінійних ділянок магістральних трубопроводів. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. № 1. С. 57-63.
4. Krizhanivskiy E., Mykhalkiv V., Taravskiy O. Influence of change of gas transportation mode on the stress condition of gas pipeline. *Metallurgical and mining industry*. 2016. No 3. P. 33-36.
5. Катренко А.В. Основи системного аналізу та методи прийняття рішень: підручник. Львів: Новий світ-2000, 2009. 396 с.
6. Пиріг Т.Ю., Дорошенко Я.В., Матвійчук Я.І. Дослідження напружено-деформованого стану балкових переходів з підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 3(76). С. 71-84.
7. Черниш О.М. Використання умов енергетичного балансу в коливальних процесах. *Конструювання, виробництво та експлуатація машин*. 2011. Вип. 41, частина II. С. 106-109.

References

1. Derkach M.P., Zubyk Y.L., Kychma A.O. Kompleksnyi pidkhid do otsinky tekhnichnoho stanu perekhodiv mahistralnykh hazoprovodiv balkovoho typu. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2005. No 15. P. 105-108. [in Ukrainian]
2. Banakhevych R.Iu., Krupka V.O., Marchuk O.M. Dosvid diahnostychnoho obstezhennia vantovoho perekhodu MH Ivatsevychi – Dolyna II n. cherez riky Dnister. *Teoriia i praktyka budivnytstva*. 2011. No 7. P. 24–27. [in Ukrainian]
3. Zhovtulia L.Ia., Oliinyk A.P., Yavorskyi A.V., Karpash M.O. Rozroblennia metodyky otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu liniinykh dilianok mahistralnykh truboprovodiv. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2017. No 1. P. 57-63. [in Ukrainian]
4. Krizhanivskiy E., Mykhalkiv V., Taravskiy O. Influence of change of gas transportation mode on the stress condition of gas pipeline. *Metallurgical and mining industry*. 2016. No3. P. 33-36. [in Ukrainian]
5. Katrenko A.V. Osnovy systemnoho analizu ta metody pryiniattia rishen: pidruchnyk. Lviv: Novyi svit-2000, 2009. 396 p. [in Ukrainian]
6. Pyrih T.Iu., Doroshenko Ya.V., Matvii-chuk Ya.I. Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu balkovykh perekhodiv z pidtrymu-iuchym elementom robochoho truboprovodu u vyhliadi fermy. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2020. No 3(76). P. 71-84. [in Ukrainian]
7. Chernysh O.M. Vykorystannia umov enerhetychnoho balansu v kolyvalnykh protsesakh. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia mashyn*. 2011. Vol. 41, Iss II. P. 106-109. [in Ukrainian]