



Прийнято 06.05.2026. Прорецензовано 27.05.2026. Опубліковано 29.05.2026.

УДК 622.692,4:519.4

DOI: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-25-35

КРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОБҐРУНТУВАННЯ ЖОРСТКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРУЖНИХ ПІДВІСІВ У НАДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ ПЕРЕХОДАХ

Ріпецький Є. Й.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0008-9585-8494>
e-mail: yevhenii.ripetskyi@nung.edu.ua

Ріпецький Р. Й.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9713-0079>
e-mail: roman20160616@gmail.com

Непеляк О. І.

Аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-4212-9476>
e-mail: oleh.nepelyak@gmail.com

Анотація. У статті обґрунтувао критеріальний підхід до вибору жорсткісних параметрів пружних підвісів у надземних трубопровідних переходах на основі співвідношення жорсткості підвісів і еквівалентної жорсткості трубопроводу. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та ефективності проектування трубопровідних систем шляхом раціонального вибору характеристик опорних елементів. Методика дослідження базується на дискретному моделюванні системи «трубопровід – пружні підвіси» із заміною розподілених параметрів еквівалентними зосередженими жорсткостями та застосуванням матричних методів аналізу. Запроваджено безрозмірний критерій жорсткості, визначений як відношення жорсткості підвісу до еквівалентної жорсткості трубопроводу в точці кріплення, що дозволяє узагальнено описати взаємодію елементів системи. У результаті чисельного аналізу встановлено закономірності зміни переміщень трубопроводу та розподілу навантажень залежно від значення критерію. Виявлено три характерні режими роботи системи: «м'який» підвіс, перехідний режим спільної роботи та «жорсткий» підвіс. Показано, що найбільша ефективність регулювання деформацій досягається у перехідній області значень критерію. Запропонований підхід дозволяє оцінювати ефективність підвісних систем, прогнозувати деформаційну поведінку трубопроводів і обґрунтовувати раціональні жорсткісні параметри. Його застосування забезпечує оптимальне

Запропоноване посилання: Ріпецький, Є. Й., Ріпецький, Р. Й. & Непеляк, О. І. (2026). Критеріальний підхід до обґрунтування жорсткісних параметрів пружних підвісів у надземних трубопровідних переходах. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1(60), 25-35. doi: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-25-35

* Відповідальний автор



поєднання гнучкості та несучої здатності системи, підвищує експлуатаційну надійність і зменшує ризик перевантажень.

Ключові слова: надземний трубопровід; пружний підвіс; жорсткість опори; напружено-деформований стан; матриця податливості; моделювання, переміщення.

Вступ

Важливими елементами інженерних мереж з транспортування рідин та газів є надземні трубопровідні переходи. Їх різноманітні конструкції широко застосовуються в промислових трубопровідних системах нафтогазової промисловості та в інших галузях енергетики [1]. Особливістю надземних трубопровідних переходів є те, що трубопровід прокладається над поверхнею землі на опорах, що забезпечує візуальний контроль його стану, спрощує обслуговування та ремонт, але водночас потребує врахування впливу кліматичних навантажень і температурних деформацій. У процесі експлуатації такі конструкції зазнають дії власної ваги, внутрішнього тиску, температурних впливів та інших навантажень, що зумовлює необхідність забезпечення їхньої надійної роботи протягом усього терміну служби [2]. Особливу роль у цьому відіграють опорні та підвісні системи, які визначають деформаційні характеристики самого трубопроводу та розподіл навантажень між його елементами [3, 4].

Одним із ефективних засобів регулювання напружено-деформованого стану трубопроводів на надземних переходах є застосування в їх конструкції пружних підвісів. Серед існуючих типів підвісів цікавим інженерним рішенням є канатні системи, які використовуються для суттєвого збільшення довжини прогону висячих трубопроводів [4]. Їх пружні властивості можуть бути успішно зведені до лінійної залежності “деформація – сила”.

Жорсткісні параметри пружних підвісів істотно впливають на поведінку всієї системи “трубопровід – пружні підвіси”, зокрема на величини прогинів, реакцій опор та характер сумісної роботи конструкції. Разом з тим пружні елементи дозволяють зменшити вплив температурних деформацій, обмежити надмірні зусилля в трубопроводі та забезпечити більш рівномірний розподіл навантажень між опорами.

Аналіз чинних нормативних документів і спеціалізованої літератури показує, що питання вибору типу опор і підвісів для трубопроводів регламентується переважно з позицій забезпечення допустимих переміщень, напружень і експлуатаційної надійності [5, 6]. При цьому конкретні рекомендації щодо вибору жорсткості пружних підвісів, як правило, ма-

ють загальний характер або базуються на інженерному досвіді проєктувальника. У результаті рішення щодо параметрів пружних елементів часто приймаються без чіткої кількісної оцінки їхнього впливу на деформаційні характеристики трубопроводу.

Існуючі нормативні та довідкові джерела з аналізу напружень у трубопроводах переважно розглядають пружні опори як задані елементи з фіксованими характеристиками, не пропонуючи формалізованого критерію оцінки їхнього впливу на деформаційні властивості трубопроводної системи в цілому.

Водночас сучасні підходи до механічного аналізу трубопроводів ґрунтуються на матричних методах і поданні системи як сукупності взаємодіючих елементів із визначеними жорсткісними або податливими характеристиками [3, 4]. У цьому контексті особливої актуальності набуває проблема кількісної оцінки співвідношення жорсткості трубопроводу та пружних підвісів і їх впливу на загальну деформаційну поведінку надземних переходів.

Отже, актуальним є питання розроблення узагальненого підходу до оцінки жорсткісних параметрів пружних підвісів на основі співвідношення їх жорсткості з еквівалентною жорсткістю трубопроводної конструкції. Такий підхід дозволяє перейти від емпіричного вибору параметрів підвісів до обґрунтованого аналізу їх впливу на переміщення, реакції та напружено-деформований стан трубопровідних систем, що є важливим для підвищення надійності та ефективності проєктування надземних трубопровідних переходів.

Аналіз вітчизняних досліджень і публікацій

Питання проєктування та розрахунку трубопровідних систем з урахуванням роботи опорних і підвісних елементів широко висвітлюються у спеціалізованій літературі з трубопровідного транспорту та інженерної механіки. У фундаментальних працях з проєктування трубопроводів підкреслюється, що опори є невід’ємною частиною розрахункової схеми трубопроводу та істотно впливають на його напружено-деформований стан, особливо в умовах дії власної ваги та температурних навантажень [3, 7–9].

Так, в монографії [3] трубопровід розглядається як просторово гнучка система, поведінка якої визначається не лише геометрією та характеристиками матеріалів, але й умовами закріплення та підтримки. Автор наголошує, що вибір типу опор (жорстких, ковзних або пружних) має здійснюватися з урахуванням гнучкості трубопроводу та допустимих переміщень. У межах аналізу гнучкості трубопровідних систем пружні підвіси фактично трактуються як еластичні опори, жорсткість яких впливає на розподіл навантажень і реакцій у системі. Хоча явний критерій співвідношення жорсткостей не вводиться, необхідність такого порівняння простежується у розрахункових рекомендаціях.

Практичні аспекти проектування підвісів детально викладені в довіднику [7], який є одним із базових джерел для інженерів-проектувальників. У цій роботі систематизовано типи трубопровідних підвісів, наведено методи визначення навантажень на підвіси та принципи вибору пружних елементів. Особливу увагу приділено пружинним підвісам постійної та змінної жорсткості, які застосовуються для компенсації вертикальних переміщень трубопроводів. При цьому жорсткість пружин розглядається як ключовий параметр, що визначає величину прогинів трубопроводу та реакцій опор, хоча її вибір переважно ґрунтується на інженерних оцінках і допустимих переміщеннях.

Основи застосування підвісів у трубопровідних системах викладені також у навчальній та довідковій літературі, зокрема в роботі [8], де наведено класифікацію опор і підвісів та описано їх функціональне призначення. У цій праці підкреслюється, що пружні підвіси застосовуються в тих випадках, коли необхідно обмежити навантаження на трубопровід при збереженні можливості його переміщення. Водночас методи кількісної оцінки впливу жорсткості підвісів на деформаційні характеристики трубопроводу подані в узагальненому вигляді.

Узагальнений огляд принципів проектування опор трубопроводів подано в публікаціях, присвячених конструкціям опор і обмежувачів переміщень, зокрема в оглядових матеріалах типу [9]. У цій роботі розглядаються функції анкерів, напрямних та пружинних підвісів у загальній системі трубопроводу. Пружні підвіси трактуються як елементи, що змінюють характер взаємодії трубопроводу з опорами, зменшуючи концентрацію зусиль та впливаючи на розподіл реакцій. При цьому зазначається,

що надмірно жорсткі або, навпаки, надто м'які підвіси можуть призводити до небажаних експлуатаційних наслідків.

Більш формалізований підхід до врахування впливу пружних опор представлений у фундаментальній літературі [10], де інженерна конструкція розглядається як сукупність елементів із заданими жорсткісними характеристиками. У таких працях пружні підвіси включаються до загальної матриці жорсткості або податливості системи, що дозволяє аналізувати їхній вплив на переміщення та напруження. Хоча основна увага приділяється забезпеченню допустимих напружень і переміщень, з математичної точки зору розрахунок базується на співвідношенні жорсткостей трубопроводу та опорних елементів.

Повертаючись до праці [3], слід відмітити основні підходи, які можуть бути використано при складанні розрахункової схеми надземного трубопроводу на канатній підвісці для розрахунку його напружено-деформованого стану. На схемі опори моделюються як пружини, а жорсткість трубопроводу розглядається через локальні податливості балки або еквівалентну жорсткість ділянки трубопроводу. В той же час, порівняння жорсткостей виконується неявно, а у вигляді фраз типу: "якщо жорсткість опори велика порівняно з жорсткістю труби..." або "коли жорсткість пружини невелика порівняно з гнучкістю труби...". Формула співвідношення жорсткостей опор та трубопроводу присутня концептуально, але не виділяється у окремий безрозмірний параметр.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що в сучасній теорії та практиці проектування трубопровідних систем пружні підвіси розглядаються як важливий елемент, який істотно впливає на деформаційні характеристики надземних переходів. Водночас у більшості робіт відсутній узагальнений кількісний критерій, який дозволяв би на етапі проектування оцінити вплив жорсткості пружних підвісів відносно жорсткості самого трубопроводу. Це обумовлює доцільність розроблення критеріального підходу, спрямованого на формалізацію відомих інженерних уявлень та підвищення обґрунтованості вибору параметрів пружних підвісів у надземних трубопровідних переходах.

Формулювання проблеми та цілей дослідження

Проблема дослідження полягає у відсутності узагальненого кількісного критерію, який дозволяв би на етапі проектування обґрунтова-

но оцінювати вплив жорсткості пружних підвісів на напружено-деформований стан надземних трубопровідних переходів з урахуванням співвідношення жорсткостей трубопроводу та опорних елементів, що ускладнює вибір параметрів підвісів і може призводити до нераціональних або небезпечних проєктних рішень.

Такий підхід повинен базуватися на аналізі сумісної роботи трубопроводу та пружних елементів і дозволяти встановити кількісні залежності між жорсткістю підвісів, деформаційними характеристиками трубопроводу та розподілом навантажень у системі.

Метою цієї роботи є обґрунтування критеріального підходу до вибору жорсткісних параметрів пружних підвісів у надземних трубопровідних переходах на основі порівняння жорсткості підвісів з еквівалентною жорсткістю трубопроводу в точках підвішування.

З урахуванням сучасних методів розрахунку трубопровідних систем із пружними підвісами, які здебільшого розглядають як еластичні опори, що взаємодіють із трубопроводом у межах єдиної механічної системи [11], така взаємодія може бути адекватно описана через жорсткісні або податливі характеристики як трубопроводу, так і пружних елементів. Виділення пружних елементів та їх групування дозволить виявити формалізований критерій, який дозволяв би кількісно порівнювати жорсткість підвісів із жорсткістю трубопроводу, ускладнює обґрунтований вибір параметрів опорних елементів на стадії проєктування.

Основна частина

Роботу з обґрунтування формалізованого критерія щодо до оцінки ефективності пружних підвісів в надземних трубопровідних переходах вирішено на принципах моделювання. При чому перевагу надано дискретним моделям подання параметрів. Власне такі моделі здатні відокремити жорсткість трубопроводу $k_{\text{тр}}$ і жорсткість підвісок $k_{\text{підв}}$. Тоді критерій ефективності пружних підвісок визначатиметься виразом:

$$\chi = \frac{k_{\text{підв}}}{k_{\text{тр}}}. \quad (1)$$

Особливістю математичного моделювання процесів деформування трубопроводів на пружних підвісах є перехід від систем із розподіленими параметрами протяжного трубопроводу [11, 12] до дискретних систем [9, 10]. При дискретизації системи розподілені параметри протяжного трубопроводу [11, 12] (рис. 1а) і навантаження замінюється еквівалентними

зосередженими силами дискретних систем [9, 10], а деформаційні властивості трубопроводу та підвісів – відповідними приведеними жорсткостями [4, 13] (рис. 1б).

Такий підхід дав змогу застосувати матричні методи аналізу системи “трубопровід – пружні підвіси”. Точками зведених параметрів виступатимуть точки твірної кріплення підвісів до трубопроводу.

Об’єктом дослідження виступає надземний трубопровідний перехід, в якому висячий трубопровід – 1 довжиною L із жорсткістю EJ зазнає додаткове розподільне навантаження q додатково утримується системою пружних підвісів у вигляді канатної підвіски – 2 за допомогою трьох утримуючих канатів – 3 (рис. 1а). Нижче наведено спрощену розрахункову схему (рис. 1б), в якій жорсткість канатної системи оцінюється трьома пружинами – 4, розташованими на однаковій відстані одна від одної. Пружини з’єднані з точками твірної трубопроводу t_1, t_2, t_3 , а їх другі кінці закріплено до жорсткої опори – 5. За правилами коливної системи [12, 13] до точок кріплення пружин приведено еквівалентні сили Q розподільного навантаження, і в цих точках визначаються жорсткісні параметри трубопроводу.

За умов такого підходу розрахункова схема містить два пружні елементи з різними фізико-механічними властивостями. Трубопровід належить до неізолюваної системи, оскільки його дискретна жорсткість залежить від точки прикладання сил. Натомість утримуючі пружини є ізолюваною системою так як їх дія є незалежною одна від одної.

Сумарна жорсткість пружних систем визначається способом їх з’єднання. Оскільки точки кріплення пружин до трубопроводу t_1, t_2, t_3 одночасно належать обом елементам і переміщуються разом, то констатуємо, що з’єднання є паралельним. Відомо, що при паралельному з’єднанні приведені жорсткості трубопроводу і пружних підвісів в точках додаються.

Запишемо параметри жорсткостей у матричному вигляді окремо для неізолюваної системи – трубопроводу та ізолюваної системи – пружних підвісів.

Для трубопроводу матриця жорсткості визначається через його податливість. У загальному випадку матриця податливості для точок t_1, t_2, t_3 має вигляд [13, 14]:

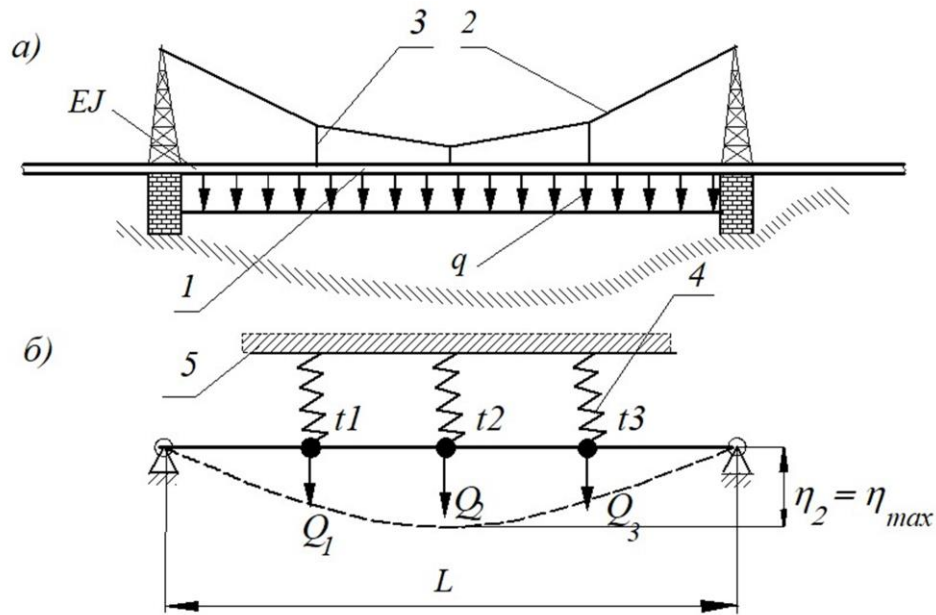


Рисунок 1 - Розрахункова схема взаємодії пружних елементів системи "трубопровід – пружні підвіси"

$$\Delta = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де δ_{ij} – податливості (переміщення) в точці j під впливом одиничної сили, прикладеної в точці i на переміщення.

Матриця податливості (2) характеризує роботу трубопроводу без урахування дії пружних підвісів і відповідає моделі вільно опертої балки на шарнірних опорах. Переміщення розрахункових точок у цьому випадку визначаються виключно згинальними деформаціями трубопроводу.

Перейдемо до виразу матриці жорсткості трубопроводу, яка є оберненою матрицею його податливості (2) і має вигляд:

$$K_{\text{тр}} = \Delta^{-1} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де k_{ij} позначення локальних жорсткостей аналогічно формулі (2).

Переходимо тепер до матриці жорсткості пружних підвісів, як ізольованої системи. Нехай три пружини мають однакову жорсткість $k_1 = k_2 = k_3 = k$. Тоді матриця жорсткості пружних підвісів прийме вигляд:

$$k_{\text{підв}} = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Як показує вираз (4) матриця пружних підвісів заповнена тільки діагональними елементами. На основі виразів (3) і (4) отримано матрицю загальної жорсткості системи "трубопровід – пружні підвіси":

$$K_{\Sigma} = k_{\text{тр}} + k_{\text{підв}} = \begin{pmatrix} k_{11} + k & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} + k & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} + k \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Загальна податливість системи визначається як обернена матриця її загальної жорсткості (5):

$$\Delta_{\Sigma} = K_{\Sigma}^{-1} = \begin{pmatrix} \delta_{11}^c & \delta_{12}^c & \delta_{13}^c \\ \delta_{21}^c & \delta_{22}^c & \delta_{23}^c \\ \delta_{31}^c & \delta_{32}^c & \delta_{33}^c \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де δ_{ij}^c нові значення податливостей з урахуванням пружних підвісів.

Отримана загальна матриця податливості (6) дозволяє визначати переміщення точок t_1, t_2, t_3 трубопроводу під дією зовнішніх сил Q_1, Q_2, Q_3 прикладених у відповідних точках. Матрична форма запису сил має вигляд:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Розрахункова формула для знаходження переміщень η_i точок трубопроводу системи "трубопровід – пружні підвіси" у матричній формі має вигляд:

$$N_S = \Delta_{\Sigma} \cdot Q. \quad (8)$$

Таблиця 1 – Результати розрахунку за формулами (2–8) переміщень точок для трубопроводу як вільно опертої балки (варіант “а”) та підпружиненого трубопроводу (варіант “б”)

Прийнятий критерій ефективності пружних підвісів		$\chi = 1$
Розподілена жорсткість трубопроводу EJ , $\text{Н}\cdot\text{м}^2$		$8,3657 \cdot 10^7$
Жорсткість трубопроводу в центрі як вільно опертої балки $k_{\text{тр}}$, Н/м		$1,8277 \cdot 10^3$
Жорсткість пружних підвісів, Н/м		$1,8277 \cdot 10^3$
Матриця податливості трубопроводу Δ , м/Н		$\begin{pmatrix} 3,0776 & 3,7613 & 2,3937 \\ 3,7615 & 5,4712 & 3,7615 \\ 2,3937 & 3,7615 & 3,0776 \end{pmatrix} \times 10^{-4}$
Матриця жорсткості трубопроводу, $K_{\text{тр}}$, Н/м		$\begin{pmatrix} 2,402 & -2,298 & 0,9402 \\ -2,298 & 3,343 & -2,298 \\ 0,9402 & -2,298 & 2,402 \end{pmatrix} \times 10^4$
Матриця жорсткості пружних підвісів $K_{\text{підв}}$, Н/м		$\begin{pmatrix} 1,828 & 0 & 0 \\ 0 & 1,828 & 0 \\ 0 & 0 & 1,828 \end{pmatrix} \times 10^4$
Загальна матриця жорсткості системи “трубопровід – пружні підвіси”, K_{Σ} , Н/м		$\begin{pmatrix} 2,585 & -2,298 & 0,9402 \\ -2,298 & 3,525 & -2,298 \\ 0,9402 & -2,298 & 2,585 \end{pmatrix} \times 10^4$
Загальна матриця податливості системи “трубопровід – пружні підвіси”, Δ_{Σ} м/Н		$\begin{pmatrix} 1,248 & 1,231 & 0,641 \\ 1,231 & 1,889 & 1,231 \\ 0,641 & 1,231 & 1,248 \end{pmatrix} \times 10^{-4}$
Матриця зовнішнього навантаження Q , Н		$\begin{pmatrix} 1000 \\ 1000 \\ 1000 \end{pmatrix}$
Варіант а	Матриця переміщення трубопроводу як вільно опертої балки N_0 , м	$\begin{pmatrix} 0,923 \\ 1,299 \\ 0,923 \end{pmatrix}$
Варіант б	Матриця переміщень підпружиненого трубопроводу N , м	$\begin{pmatrix} 0,312 \\ 0,435 \\ 0,312 \end{pmatrix}$

Покажемо ефективність застосування пружних підвісів на трубопровідних переходах в частині зменшення величини максимального прогину трубопроводу на середині його прогону. Для порівняння використано два варіанта. У першому варіанті “а” розглядається трубопровід довжиною $L = 130$ м, згинальною жорсткістю $EJ = 8,365 \cdot 10^7$ $\text{Н}\cdot\text{м}^2$ як вільно оперта балка на шарнірних опорах. У другому варіанті “б” конструкція додатково містить три пруж-

них підвіси, що утримують трубопровід в межах прогону (рис. 1). Параметри жорсткості пружних підвісів – пружин підібрано таким чином, що б за критерієм ефективності виконувалася умова $\chi = 1$.

Таким чином, два варіанти відрізняється тим, що в першому випадку трубопровід виступає як вільно оперта балка, а другому випадку – він є крім того ще й підпружиненим. Спільним моментом для двох варіантів “а” і

“ σ ” є дія зовнішнього навантаження однакова за характером і величиною $Q_i = 1000$ Н.

Розрахунок максимальних прогинів виконано за формулами (2–8), а їх покрокові результати зведено в таблицю 1.

З отриманих матриць переміщень N_0 і N зупинимося на значеннях максимальних прогинів, які для варіантів “ a ” та “ σ ” відповідно становлять

$\eta_{20} = 1,299$ м і $\eta_2 = 0,435$ м. Як видно з розрахунків, при $\chi = 1$ досягнуто зменшення максимального прогину майже у три рази порівняно з варіантом вільно опертої балки.

Обговорення результатів

Інтерпретацію отриманих результатів моделювання доцільно здійснювати з позицій їх інженерного застосування. Основну увагу зосереджено на характері деформування системи, розподілу навантажень між її елементами та ефективності роботи підвісних пристроїв у надземних трубопровідних переходах залежно від співвідношення жорсткості пружних підвісів і зведеної жорсткості трубопроводу. Використання запропонованого безрозмірного критерію жорсткості χ дозволяє перейти від аналізу окремих числових результатів (табл. 1) до узагальненого опису поведінки системи в широкому діапазоні параметрів жорсткості підвісів.

Оцінку зміни геометричних параметрів деформування трубопроводу доцільно здійснювати за допомогою безрозмірного показника нормованого переміщення η_2/η_{20} , а силову дію зовнішнього навантаження – через відношення реакції підвісу R до активного навантаження Q (R/Q).

Результати аналізу поведінки системи “трубопровід – пружні підвіси” подано у вигляді двох графіків. Перший характеризує геометричні зміни залежність нормованого переміщення від критерія ефективності (рис. 2а), а другий відображає силовий розподіл між несучими елементами системи “трубопровід – пружні підвіси” (рис. 2б):

$$\frac{\eta_2}{\eta_{20}} = f_1(\chi); \quad \frac{R}{Q} = f_2(\chi), \quad (9)$$

де η_2 – переміщення точки t_2 за наявності підвісу при різних значеннях χ ,

η_{20} – відповідне переміщення цієї точки за відсутності підвісу при значеннях $\chi=1$,

R – реакція підвісу.

За виразом (9), використовуючи наведений алгоритм (2–8) отримано числові значення нормованого переміщення і відносних реакції підвісів. Результати аналізу поведінки системи «трубопровід – пружні підвіси» подано у вигляді двох узагальнених графічних залежностей (рис. 2). Перший графік характеризує зміну нормованого переміщення трубопроводу (рис. 2а), а другий відображає розподіл навантаження між елементами системи у вигляді залежностей (9).

Оскільки параметр жорсткості підвісів може змінюватися в широкому діапазоні ($0 < \chi < +\infty$) – від дуже малих значень, що відповідають «м'якому» підвісу, до значних величин, характерних для «жорсткого» підвісу, тому шкалу осі абсцис на графіках подано у логарифмічному масштабі. Такий підхід забезпечує однакову роздільну здатність для кожного порядку величини та є типовим для аналізу критеріальних залежностей [15].

Перший графік нормованого переміщення трубопроводу $\eta_2/\eta_{20} = f_1(\chi)$ має такі ключові ознаки (рис. 2а): монотонно спадний характер, наявність платоподібної ділянки при малих значеннях критерію, різке зменшення переміщень у центральній області та поступове насичення при великих значеннях.

Аналіз співвідношення жорсткості пружного підвісу та еквівалентної жорсткості трубопроводу дозволяє виділити три характерні зони значень критерію χ : зону м'якого підвісу ($\chi \ll 0,1$), перехідну зону спільної роботи трубопроводу і підвісу ($0,1 \lesssim \chi \lesssim 10$) та зону жорсткого підвісу ($\chi \gg 10$).

У зоні малих значень критерію ($\chi \ll 0,1$) зміна жорсткості підвісу практично не впливає на величину прогинів трубопроводу, що свідчить про домінуючу роль жорсткості самої трубопровідної конструкції.

У перехідній зоні ($0,1 \lesssim \chi \lesssim 10$) спостерігається найбільш інтенсивне зменшення нормованих переміщень, що вказує на активну спільну роботу трубопроводу та підвісу і високу чутливість системи до вибору параметрів жорсткості. Саме в перехідній зоні вибір жорсткісних параметрів підвісу має визначальний вплив на деформаційні характеристики надземних трубопровідних переходів.

За великих значень критерію ($\chi \gg 10$) ефект подальшого збільшення жорсткості підвісу поступово насичується, а зменшення прогинів стає незначним.

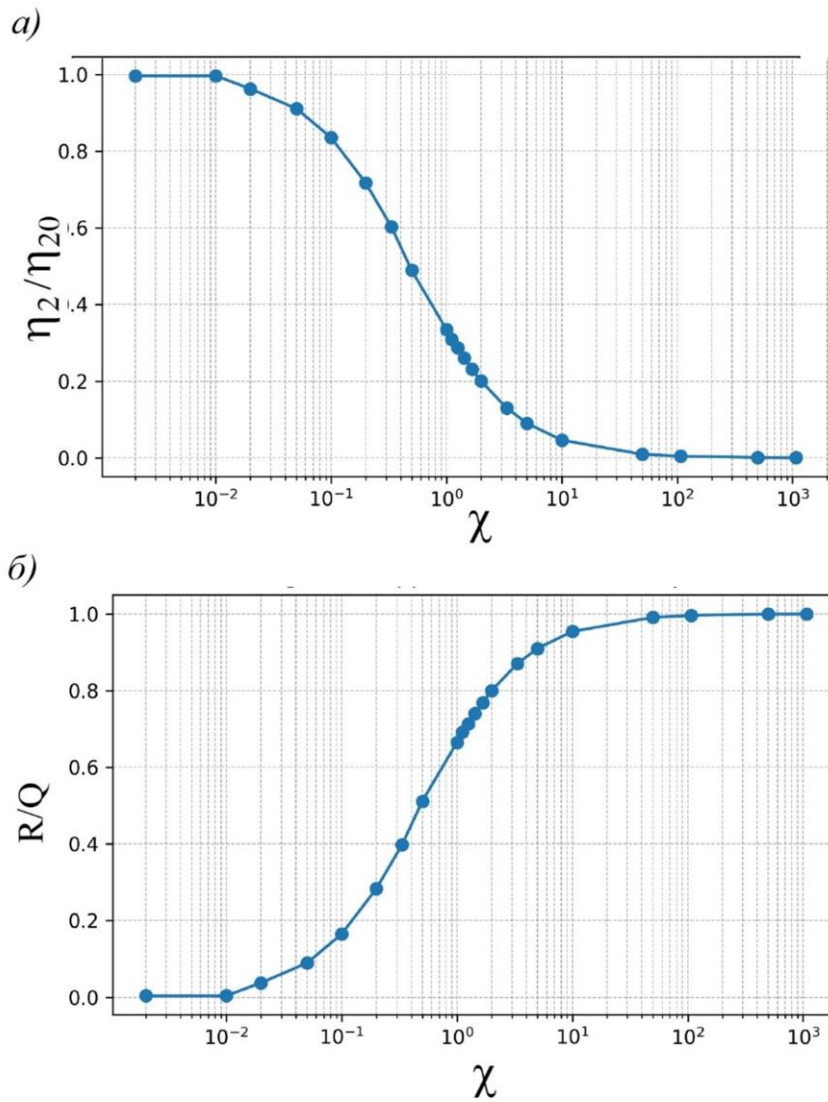


Рисунок 2 - Залежності нормованого переміщення трубопроводу η_2/η_{20} (а) і відносної реакції підвісу R/Q (б) від безрозмірного критерію жорсткості $\chi=k_{підв}/k_{тр}$

Слід зауважити, що ордината графіка нормованого переміщення є одночасно частка сили, що несе трубопровід. Тому графік нормованого переміщення трубопроводу (рис. 2а) дозволяє перейти від аналізу переміщень до аналізу силового балансу, тобто визначити, яка частина навантаження сприймається трубопроводом, а яка — пружним підвісом (рис. 2б).

Так, у зоні “м’якого підвісу” при $\chi = 0,09$ на пружний підвіс припадає приблизно 9% навантаження, тоді як близько 91% сприймається трубопроводом. При $\chi = 1,0$ розподіл навантаження між елементами становить 33% і 67%. Слід зазначити, що при $\chi = 1,0$ порушується принцип розподілу навантажень 50% на 50%. Це пояснюється наявністю інших пружних підвісів та їх дію відповідно до виразів (2–8). В зоні “жорсткого підвісу” при $\chi = 11$ пружний

елемент сприймає вже 93% загального навантаження.

Тобто критерій χ безпосередньо задає розподіл навантаження між елементами системи і фактично визначає частку навантаження, яка передається від трубопроводу до підвісів.

Таким чином, результати підтверджують доцільність використання критерію χ як узагальненого показника для оцінки ефективності пружних підвісів і обґрунтування їх жорсткісних параметрів при проектуванні надземних трубопровідних переходів.

Висновки

1. У межах критеріального підходу до обґрунтування жорсткісних параметрів пружних підвісів надземних трубопровідних переходів запропоновано безрозмірний критерій жорсткості χ , що визначається як відношення жорсткості пружного підвісу до еквівалентної жорсткості трубопроводу. Запроваджений критерій забезпечує узагальнену оцінку взаємодії елементів системи “трубопровід – пружні підвіси” під дією зовнішніх навантажень з урахуванням геометричних параметрів конструкції та може бути використаний як інструмент для обґрунтованого вибору раціональних жорсткісних характеристик підвісів.

2. Використання критерію χ забезпечує наочну інтерпретацію деформаційної поведінки трубопроводу та силової взаємодії між елементами конструкції і дає змогу виділити характерні режими роботи пружних підвісів (м'який, перехідний та жорсткий), що істотно спрощує аналіз і обґрунтування жорсткісних параметрів опорних елементів. Введений кри-

терій фактично визначає частку навантаження, яка передається від трубопроводу до підвісів, і тому може розглядатися як параметр силового перерозподілу в системі.

3. Критеріальний підхід створює основу для переходу від емпіричного вибору жорсткості пружних підвісів до раціонального інженерного проектування, підвищуючи надійність і прогнозованість роботи надземних трубопровідних переходів.

4. Використання запропонованого критерію дозволяє забезпечити оптимальне поєднання гнучкості та несучої здатності системи, підвищити експлуатаційну надійність надземних трубопровідних переходів і зменшити ризик виникнення надмірних напружень або локальних перевантажень.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Януль С., Павлов К., Коротя М., Галянт С. Характеристика газотранспортної системи України. *Економічний вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки*. 2019. 1(17). С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.29038/2411-4014-2019-01-31-38>.
2. Грудз В. Я., Тимків Д. Ф., Михалків В. Б., Костів В. В. Обслуговування і ремонт газопроводів : монографія. Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2009. 711 с.
3. Antaki G. A. Piping and pipeline engineering: Design, construction, maintenance, integrity, and repair. New York, NY : Marcel Dekker, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203911150>.
4. Ріпецький Є. Й., Ріпецький Р. Й., Непеляк О. І. Отримання матриці податливості несучого канату однопролітного висячого трубопроводу. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2025. № 20(76). С. 227–243. DOI: [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20\(76\)-227-243](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20(76)-227-243).
5. Trevoho I., Kukhtar D., Pkiv E., Zhytar D., Lavrishko Ie. Monitoring the position of overhead crossings of main pipelines using total stations. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510095>.
6. Тараєвський О. Деякі аспекти технічного стану магістральних трубопроводів із урахуванням їх тривалої експлуатації. *Нафтогазова галузь України*. 2014. № 6. С. 43–46.
7. Carpenter J. A., Becht C. Pipe Supports and Restraints. New York : ASME Press, 2007.
8. Магаліф В. Я. Трубопроводи теплових електростанцій : монографія. Київ : Вища школа, 2010. 412 с.
9. Peng L. C., Peng T. Pipe Stress Engineering. New York : ASME Press, 2009.
10. Timoshenko S. P., Gere J. M. Theory of elastic stability. 2nd ed. New York, NY : McGraw-Hill, 2009. 560 p.
11. Олійник А. П., Фешанич Л. І., Чернишов М. Ю. Математичне моделювання процесу деформування трубопроводів, що експлуатуються в підземному та надземному режимах. *Методи та прилади контролю якості*. 2022. № 2(49). С. 89–94. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2\(49\)-89-94](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2(49)-89-94).
12. Грудз В. Я., Тутко Т. Ф., Пиріг Т. Ю. Вільні коливання надземної ділянки магістрального газопроводу після проходження по ній очисного чи діагностичного поршня. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 3(72). С. 69–75. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3\(72\)-69-75](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3(72)-69-75).

13. N. Jazar R., Marzbani H. Mechanical Vibrations Modeling. *Vehicle Vibrations*. Cham : Springer, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43486-0_4.

14. Pilkey W. D., Kitiş L. Dynamic stiffness matrix for a beam element with shear deformation. *Shock and Vibration*. 1995. Vol. 2(2). P. 155–162. DOI: <https://doi.org/10.3233/sav-1995-2206>.

15. Тевяшев А. Д., Шевченко Л. Д. Математичне моделювання систем і процесів : підручник. Харків : ХНУРЕ, 2022. 304 с.

References

1. Yanul, S., Pavlov, K., Korotia, M., & Haliant, S. (2019). Kharakterystyka hazotransportnoi systemy Ukrainy [Characteristics of the gas transport system of Ukraine]. *Ekonomichnyi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky*, 1(17), 31–38. (in Ukrainian) DOI: <https://doi.org/10.29038/2411-4014-2019-01-31-38>.

2. Hrudz, V. Ya., Tymkiv, D. F., Mykhalkiv, V. B., & Kostiv, V. V. (2009). *Obsluhovuvannia i remont hazoprovodiv: Monohrafiia* [Maintenance and repair of gas pipelines: A monograph]. Lileia-NV. (in Ukrainian)

3. Antaki, G. A. (2003). *Piping and pipeline engineering: Design, construction, maintenance, integrity, and repair*. Marcel Dekker. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203911150>.

4. Ripetskyi, Ye. Yo., Ripetskyi, R. Yo., & Nepeliak, O. I. (2025). Otrymannia matrytsi podatlyvosti nesuchoho kanatu odnoprolytneho vysiachoho truboprovodu [Obtaining the compliance matrix of the carrying cable of a single-span suspension pipeline]. *Prykarpatskyi visnyk NTSH. Chyslo*, (20(76)), 227–243. (in Ukrainian) DOI: [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20\(76\)-227-243](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20(76)-227-243).

5. Trevoho, I., Kukhtar, D., Ilkiv, E., Zhytar, D., & Lavrishko, Ie. (2024). *Monitoring the position of overhead crossings of main pipelines using total stations*. Paper presented at the International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024». DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510095>.

6. Taraievskiy, O. (2014). Deiaki aspekty tekhnichnoho stanu mahistralnykh truboprovodiv iz urakhuvanniam yikh tryvaloї ekspluatatsii [Some aspects of the technical condition of main pipelines taking into account their long-term operation]. *Naftohazova haluz Ukrainy*, (6), 43–46. (in Ukrainian)

7. Carpenter, J. A., & Becht, C. (2007). *Pipe supports and restraints*. ASME Press.

8. Mahalif, V. Ya. (2010). *Truboprovody teplovykh elektrostantsii: Monohrafiia* [Pipelines of thermal power plants: A monograph]. Vyshcha shkola. (in Ukrainian)

9. Peng, L. C., & Peng, T. (2009). *Pipe stress engineering*. ASME Press.

10. Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (2009). *Theory of elastic stability* (2nd ed.). McGraw-Hill.

11. Oliinyk, A. P., Feshanych, L. I., & Chernyshov, M. Yu. (2022). Matematychnе modeliuвання protsesu deformuvannia truboprovodiv, shcho ekspluatuiutsia v pidzemnomu ta nadzemnomu rezhymakh [Mathematical modeling of the process of deformation of pipelines operated in underground and overhead modes]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, (2(49)), 89–94. (in Ukrainian) [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2\(49\)-89-94](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2022-2(49)-89-94).

12. Hrudz, V. Ya., Tutko, T. F., & Pyrih, T. Yu. (2019). Vilni kolyvannia nadzemnoi dilianky mahistralnoho hazoprovodu pislia prokhodzhennia po nii ochysnoho chy diahnostychnoho porshnia [Free vibrations of the overhead section of the main gas pipeline after the passage of a cleaning or diagnostic pig through it]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, (3(72)), 69–75. (in Ukrainian) DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3\(72\)-69-75](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3(72)-69-75).

13. Jazar, R. N., & Marzbani, H. (2024). Mechanical vibrations modeling. In *Vehicle Vibrations* (pp. 143–198). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43486-0_4

14. Pilkey, W. D., & Kitiş, L. (1995). Dynamic stiffness matrix for a beam element with shear deformation. *Shock and Vibration*, 2(2), 155–162. DOI: <https://doi.org/10.3233/sav-1995-2206>.

15. Teviashev, A. D., & Shevchenko, L. D. (2022). *Matematychnе modeliuвання system i protsesiv: Pidruchnyk* [Mathematical modeling of systems and processes: A textbook]. KHNURE. (in Ukrainian)

CRITERIA-BASED APPROACH TO JUSTIFYING THE STIFFNESS PARAMETERS OF ELASTIC HANGERS IN ABOVE-GROUND PIPELINE CROSSINGS

Ripetskyi Ye. Yo.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-9585-8494>
e-mail: yevhenii.ripetskyi@nung.edu.ua

Ripetskyi R. Yo.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9713-0079>
e-mail: roman20160616@gmail.com

Nepeliak O. I.

Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-4212-9476>
e-mail: oleh.nepelyak@gmail.com

Abstract. The aim of this study is to substantiate a criterion-based approach to selecting stiffness parameters of elastic hangers in above-ground pipeline crossings based on the ratio between hanger stiffness and equivalent pipeline stiffness. The relevance of the research is determined by the need to improve reliability and design efficiency of pipeline systems through a rational choice of support characteristics. The methodology is based on discrete modelling of the “pipeline–elastic hanger” system, where distributed parameters are replaced by equivalent concentrated stiffnesses, enabling the use of matrix analysis methods. A dimensionless stiffness criterion is introduced as the ratio of hanger stiffness to the equivalent pipeline stiffness at the attachment point, providing a generalized parameter for describing system interaction. Numerical analysis revealed regularities in pipeline displacements and load distribution depending on the criterion value. Three characteristic operating regimes were identified: a “soft” hanger regime dominated by pipeline flexibility, a transitional regime of joint interaction, and a “stiff” hanger regime where hangers carry most of the load. The highest efficiency in controlling deformations is achieved within the transitional range. The proposed approach enables evaluation of hanger system efficiency, prediction of deformation behaviour, and justification of rational stiffness parameters. Its application ensures an optimal balance between flexibility and load-bearing capacity, improves operational reliability, and reduces the risk of excessive stresses and local overloads.

Keywords: above-ground pipeline; elastic hanger; support stiffness; stress-strain state; matrix method; modelling; displacement.