

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКОВИХ ПЕРЕХОДІВ З ПІДТРИМУЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ РОБОЧОГО ТРУБОПРОВОДУ У ВИГЛЯДІ ФЕРМИ

Т. Ю. Пиріг\*, Я. В. Дорошенко, Я. І. Матвійчук

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

Наведено сфери застосування і переваги надземної схеми прокладання трубопроводів або їхніх окремих ділянок. Розглянуто класифікацію за конструктивними ознаками найбільш поширених систем надземних трубопровідних переходів на підставі узагальнення наукових публікацій і досвіду трубопровідного будівництва. Вказано діапазони розрахункової довжини прогонів для прямолінійних одно-багатопрогінних переходів без компенсаторів поздовжніх деформацій (із зацемленими кінцями), а також в багатопрогінних системах з компенсаторами залежно від діаметра труб, номінальної товщини стінки труби і марки трубої сталі для газопроводів та нафтопроводів і нафтопродуктопроводів відповідно. Наведено опис конструкції балкових систем надземних трубопровідних переходів з підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми і запропоновано методіку оцінки їхнього напружено-деформованого стану. За побудованими вантажною та одиничною розрахунковими схемами ферми перерізом у вигляді рівнобедреного трикутника (висота – 3 м, ширина – 2,02 м) визначено коефіцієнти жорсткості пружно-піддатливих опор, проведено підбір поперечних перерізів елементів ферми, знайдено шукані прогини трубопроводу і виникаючі внутрішні силові фактори (згинальні моменти та реакції пружно-піддатливих опор) в точках обпінання трубопроводу на ферму, виконано перевірку міцності трубопроводу на дію максимального згинального моменту і показано можливість прокладання через водну перешкоду балкового переходу газопроводу  $D_3 \times \delta_n = 1420 \times 18,7$  мм довжиною  $L_n = 102$  м з компенсаторами з підтримуючим елементом у вигляді ферми, яка виключає використання проміжних опор. Таким чином, показано, що наявність ферми дозволяє збільшити довжину прогону, який перекривається, в 2-3 рази без влаштування проміжних опор при достатній горизонтальній жорсткості.

Ключові слова: надземне прокладання; інерозрізна багатопрогінна балка; пружно-піддатлива опора; матричний метод розрахунку пружних стрижневих систем.

Указаны области применения и преимущества надземной схемы прокладки трубопроводов или их отдельных участков. Рассмотрена классификация по конструктивным признакам наиболее распространенных систем надземных трубопроводных переходов на основании обобщения научных публикаций и опыта трубопроводного строительства. Указаны диапазоны расчетной длины пролетов для прямолинейных одно-многопролетных переходов без компенсаторов продольных деформаций (с зацементированными концами), а также в многопролетных системах с компенсаторами в зависимости от диаметра труб, номинальной толщины стенки трубы и марки трубої стали для газопроводов и нефтепроводов и нефтепродуктопроводов соответственно. Приведено описание конструкции балочных систем надземных трубопроводных переходов с поддерживающим элементом рабочего трубопровода в виде фермы и предложена методика оценки их напряженно-деформированного состояния. По построенным грузовой и единичной расчетным схемам фермы сечением в виде равнобедренного треугольника (высота – 3 м, ширина – 2,02 м) определены коэффициенты жесткости упруго-податливых опор, проведен подбор поперечных сечений элементов фермы, найдены искомые прогибы трубопровода и возникающие внутренние силовые факторы (изгибающие моменты и реакции упруго-податливых опор) в точках опоры трубопровода на ферму, выполнена проверка прочности трубопровода к действию максимального изгибающего момента и показана возможность прокладки через водную преграду балочного перехода газопровода  $D_n \times \delta_n = 1420 \times 18,7$  мм длиной  $L_n = 102$  м с компенсаторами с поддерживающим элементом в виде фермы, исключающей использование промежуточных опор. Таким образом, показано, что наличие фермы позволяет увеличить длину перекрываемого пролета в 2-3 раза без устройства промежуточных опор при достаточной горизонтальной жесткости.

Ключевые слова: надземная прокладка; неразрезная многопролетная балка; упруго-податливая опора; матричный метод расчета упругих стержневых систем.

The areas of application and advantages of the over-ground piping or pipe section layout are given. The classification according to the design features of the most common systems of overhead pipeline crossings on the basis of generalization of scientific publications and experience of pipeline construction are considered. The authors indicate the ranges of the effective spans for rectilinear single-span and multi-span crossings without compensators of longitudinal strains (with the fixed ends) and also in multi-span systems with compensators depending on the diameter of pipes, nominal pipe wall thickness and brand of pipe steel for gas, oil and oil-products pipelines respectively. The description of the design of beam systems of overhead pipeline crossings with a truss-form supporting element of the operating pipeline is given and the procedure for estimating their stress-strain state is suggested. According to the constructed cargo and unit calculation schemes of the truss with a cross-section in the form of an isosceles triangle (height – 3 m, width – 2.02 m) the stiffness coefficients of elastic-malleable supports is determined. The selection of cross-sections of truss members is carried out, the required deflections of the pipeline and the emerging internal force factors (bending moments and reactions of elastic-malleable supports) at the points where the pipeline rests on the truss are found. The strength of the pipeline to the action of the maximum bending moment is checked and the possibility of the cross-water layout of the beam crossing of the gas pipeline is shown. This is the  $D_{ext} \times \delta_n = 1420 \times 18,7$  mm gas pipeline with the length of  $L_{cr} = 102$  m. It has compensators with a truss-form supporting element which eliminates the use of intermediate supports. Thus, it was shown that the truss makes it possible to double or triple the length of the span using no intermediate supports and preserving sufficient horizontal rigidity.

Key words: over-ground layout; continuous multi-span beam; elastic-malleable support; matrix method of elastic rod systems calculation.

## Вступ

Надземна схема прокладання трубопроводів або їхніх окремих ділянок (рис. 1) рекомендується до застосування в умовах сильно пересіченого рельєфу місцевості (гірські умови), через болота і обводнені ділянки, на вічномерзлих, спучуваних та просідаючих ґрунтах, в районах гірничих виробок і зсувів, барханних пісках, а також на переходах через природні та штучні перешкоди (рис. 2) [1]. При надземному прокладанні зводиться до мінімуму обсяг земляних робіт, відпадає необхідність у дороговартісному привантаженні, а також у облаштуванні захисту від ґрунтової корозії і блукаючих струмів [2].

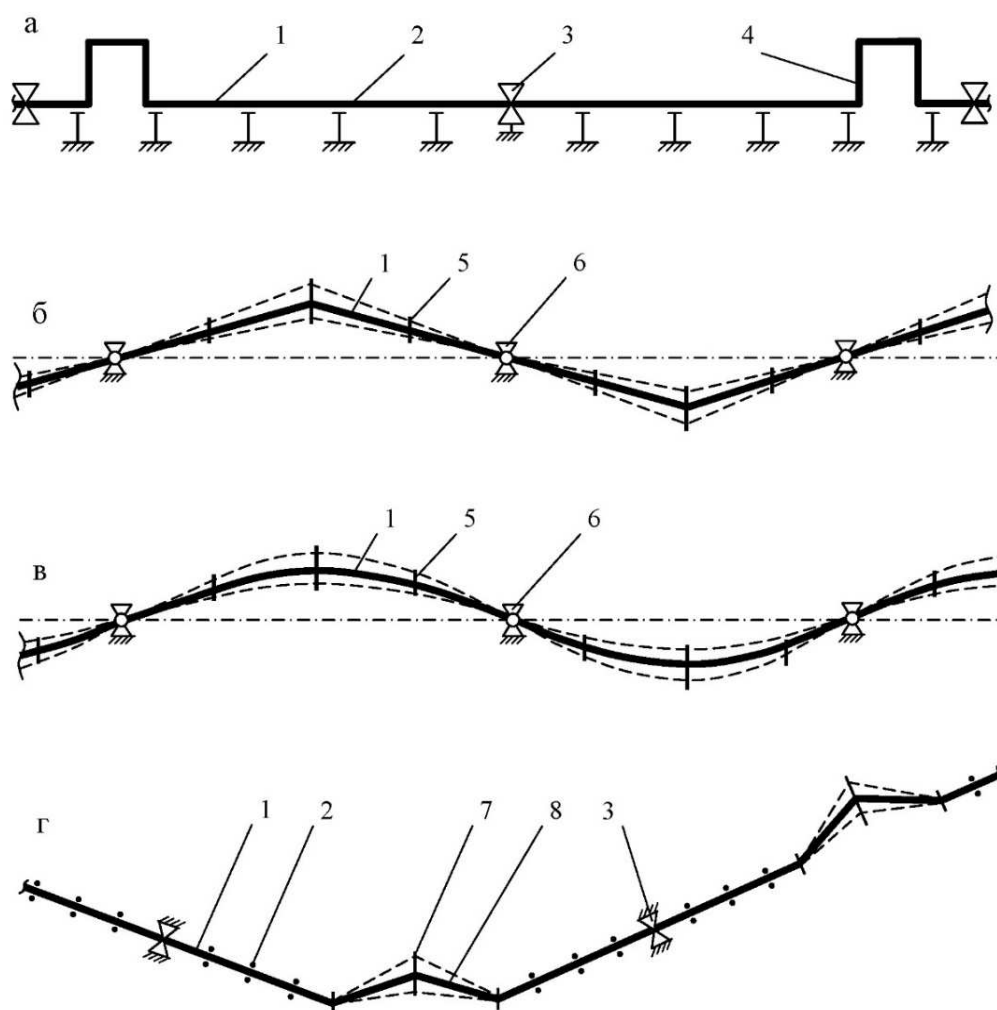
## Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

На підставі узагальнення наукових публікацій і досвіду трубопровідного будівництва запропонована наступна класифікація надземних трубопровідних переходів за конструктивними ознаками [3]:

- а) із самонесучим робочим трубопроводом:
  - балкові (з компенсаторами або без компенсаторів);
  - аркові (одно- або багатотрубні);
  - провислі нитки (одно- або багатотрубні);
- б) з допоміжними підтримуючими елементами:
  - у вигляді труби (посилені кожухом або трубою над робочим трубопроводом);
  - у вигляді тросових елементів (вісячі або вантові переходи);
  - у вигляді консольних опор (Т-подібних, вантових або балансірно-просторових).

Балковими називаються системи надземного прокладання газонафтопроводів, в яких трубопровід працює на згин як проста або багатопрогінна нерозрізна балка [4]. Балкові системи є самонесучими, не потребують додаткових елементів для підтримання або підсилення трубопроводу. Розрахункова довжина прогонів для прямолінійних одно-багатопрогінних переходів без компенсаторів поздовжніх деформацій (із защемленими кінцями) залежно від діаметра труб, номінальної товщини стінки труби і марки трубної сталі складає від 20 до 40 м для газопроводів, зовнішній діаметр яких дорівнює від 530 до 1420 мм, та від 15 до 30 м для нафтопроводів і нафтопродуктопроводів, зовнішній діаметр яких дорівнює від 530 до 1220 мм [5]. В багатопрогінних системах з компенсаторами розрахункова довжина прогонів складає від 30 до 50 м для газопроводів, зовнішній діаметр яких дорівнює від 530 до 1420 мм, та від 20 до 40 м для нафтопроводів і нафтопродуктопроводів, зовнішнім діаметром від 530 до 1220 мм [6].

З метою збільшення довжини прогонів, які перекриваються, останнім часом з'явилося нове конструктивне рішення балкових систем надземних трубопровідних переходів з підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми (рис. 3) [7]. Дана конструкція трубопровідного переходу складається з кінцевих опор 2 і 4 та підтримуючого елемента робочого трубопроводу у вигляді ферми 3, яка може мати прямокутний поперечний переріз, утворений двома плоскими фермами, з'єднаними між собою за допомогою поперечних і діагональних зв'язків в єдину жорстку конструкцію, або переріз у вигляді рівнобедреного трикутника. Всередині ферми розміщується трубопровід 1.



*а – трубопровід з компенсаторами; б – трубопровід у вигляді зигзагоподібного самокомпенсуючого контуру; в – пружно викривлений самокомпенсуючий трубопровід; г – трубопровід зі слабозігнутими ділянками*

*1 – трубопровід; 2 – проміжна поздовжньо-рухома опора; 3 – нерухома опора; 4 – П-подібний компенсатор; 5 – проміжна ковзаюча опора; 6 – шарнірна опора; 7 – вільно-рухома опора; 8 – слабозігнута ділянка (компенсатор)*

**Рисунок 1 – Надземні схеми прокладання лінійної частини магістрального трубопроводу**

Пояси ферм 5 можуть мати тавровий поперечний переріз, а решітка 6 може бути виконана з рівнобічних кутників. Конструкція трубопровідного переходу може передбачати наявність експлуатаційного містка для огляду і обслуговування трубопроводу [8].

#### Формулювання цілей статті

Для оцінки напружено-деформованого стану надземних переходів з підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми в якості розрахункової схеми трубопроводу запропоновано розглядати як нерозрізну багатопрогінну балку, яка обпирається в прогоні на пружно-піддатливі опори (рис. 4). Завданням дослідження є визначення коефіцієнтів жорсткості пружно-піддатливих опор, проведення

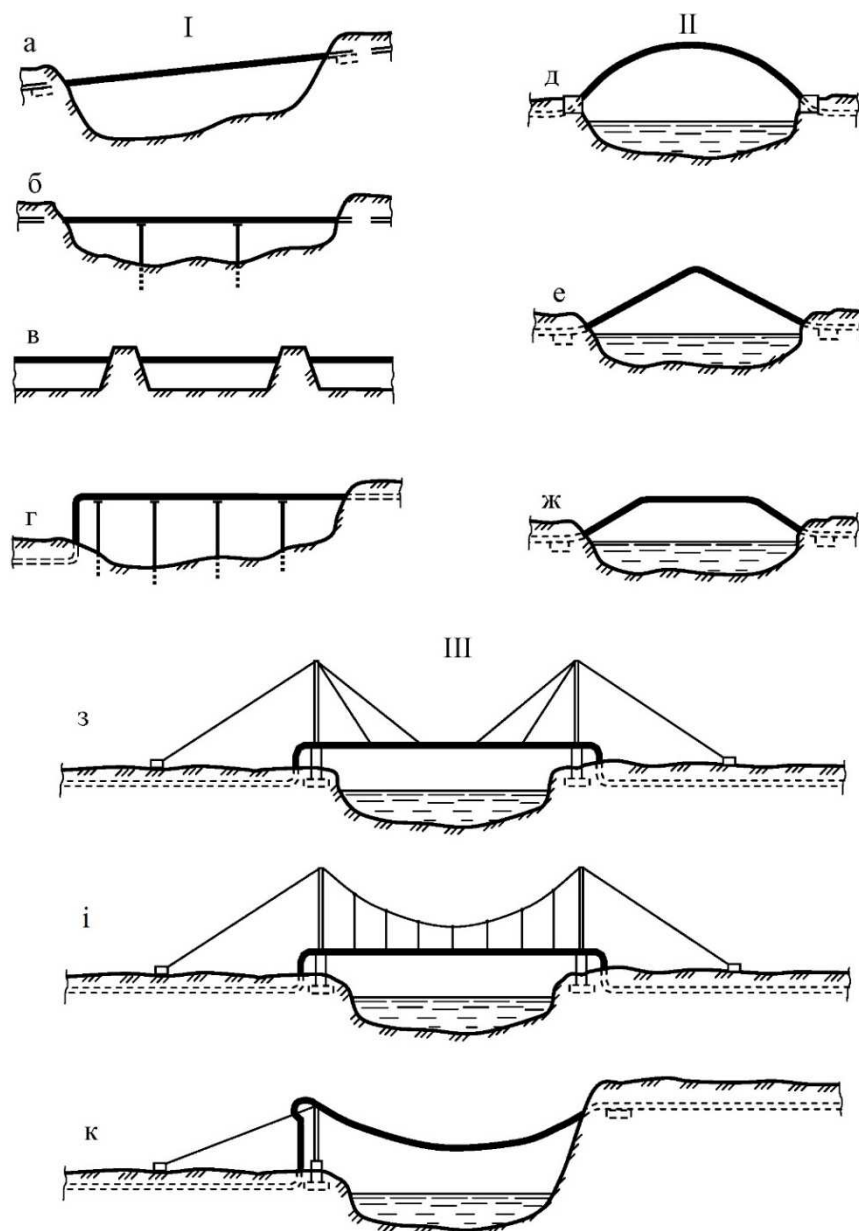
підбору поперечних перерізів елементів ферми, знаходження шуканих прогинів трубопроводу і виникаючих внутрішніх силових факторів (згинальних моментів та реакцій пружно-піддатливих опор) і перевірка міцності трубопроводу на дію максимального згинального моменту.

#### Висвітлення основного матеріалу дослідження

Розрахункова методика розглядуваного трубопровідного переходу реалізовується за наступним алгоритмом:

– Розраховується розподілене навантаження, яке діє на конструкцію.

– Розрахунком підбирається підтримуюча ферма з числа типових конструкцій.



*а* – однопрогінний трубопровід; *б* – багатопрогінний трубопровід у звичайних ґрунтах; *в* – багатопрогінний трубопровід в земляних призмах; *г* – трубопровід з Г- або Z-подібним компенсатором; *д* – однотрубний перехід по круговій або параболічній формі осі; *е* – трикутний; *ж* – трапецеїдальний; *з* – вантовий перехід; *і* – гнучкий перехід; *к* – самонесучий перехід

*I* – балкові системи; *II* – аркові системи; *III* – висячі системи

**Рисунок 2 – Надземне прокладання окремих ділянок магістральних трубопроводів**

– Трубопровідний перехід розглядається у вигляді балки кільцевого поперечного перерізу, а ферма замінюється пружно-піддатливими опорами, кількість яких відповідає кількості точок опори трубопроводу всередині цієї ферми.

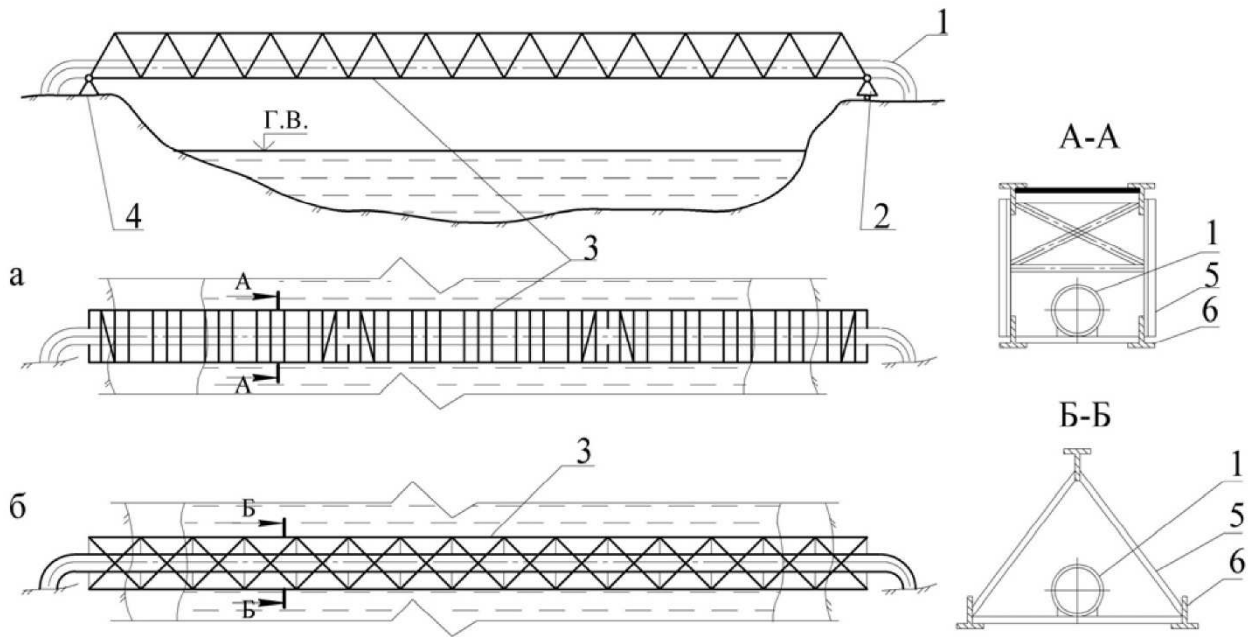
В розглядуваній розрахунковій схемі зосереджені сили  $P_1 - P_n$  визначаються шляхом приведення розрахункового розподіленого навантаження на опорні вузли.

Визначаються коефіцієнти жорсткості пружно-піддатливих опор за формулою:

$$\beta_i = \frac{P_i}{f_i}, \quad (1)$$

де  $f_i$  – прогин ферми в точці прикладання одиничної сили, який визначається за формулою Максвелла-Мора:

$$f_i = \sum_{i=1}^n \int \frac{M_H^i M_{o0}^i dl}{E_i I_i} + \sum_{i=1}^n \int \frac{N_H^i N_{o0}^i dl}{E_i I_i} + \sum_{i=1}^n \int \mu_i \frac{Q_H^i Q_{o0}^i dl}{G_i A_i}, \quad (2)$$



а – з фермою прямокутного перерізу; б – з фермою перерізом у вигляді рівнобедреного трикутника  
1 – трубопровід; 2, 4 – кінцеві опори; 3 – ферма; 5 – решітка ферми; 6 – пояси ферми

Рисунок 3 – Трубопровідний перехід з підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми

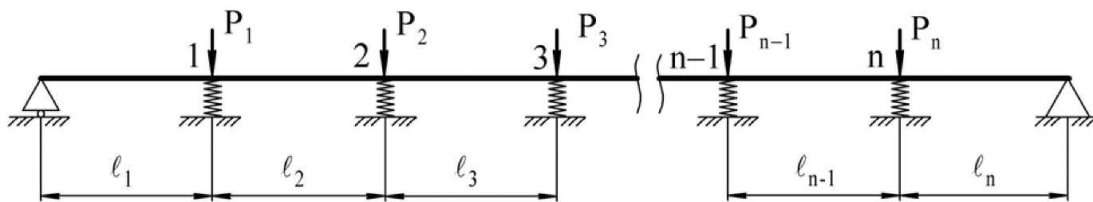


Рисунок 4 – Розрахункова схема трубопровідного переходу з підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми

де  $i$  – номер силової ділянки;

$n$  – кількість силових ділянок;

$l$  – довжина ділянки;

$M_n^i, M_{od}^i$  – згинальні моменти на  $i$ -тій силовій ділянці від заданого зовнішнього навантаження і одиничної сили відповідно;

$N_n^i, N_{od}^i$  – поздовжні сили на  $i$ -тій силовій ділянці від заданого зовнішнього навантаження і одиничної сили відповідно;

$Q_n^i, Q_{od}^i$  – поперечні сили на  $i$ -тій силовій ділянці від заданого зовнішнього навантаження і одиничної сили відповідно;

$\mu_i$  – безрозмірний коефіцієнт нерівномірності зсувів по перерізу, який залежить від форми  $i$ -того перерізу;

$E_i, G_i$  – модулі пружності матеріалу  $i$ -тої ділянки першого і другого роду відповідно;

$I_i$  – осьовий момент інерції  $i$ -тої ділянки;

$A_i$  – площа поперечного перерізу  $i$ -тої ділянки.

Ферма працює таким чином, що при прикладанні в вузлах зосереджених навантажень її елементи (стрижні) працюють здебільшого на центральний розтяг або стиск. Оскільки по довжині кожного стрижня ферми поздовжні сили і площа перерізу є постійними та враховуючи, що  $\int_0^l dl = l$ , вираз (2) для переміщення вузлових точок ферми набуде вигляду:

$$f_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_n^i N_{od}^i l_i}{E_i A_i}. \quad (3)$$

Поздовжні зусилля  $N_n^i$  і  $N_{od}^i$  в елементах ферми визначаються за шарнірною схемою методом вирізання вузлів.

Проводиться підбір поперечних перерізів елементів ферми.

Поперечний переріз поясів підбирається з умови їхньої міцності за формулою:

$$A_n = \frac{N_n}{[\sigma]}, \quad (4)$$

де  $N_n$  – зусилля, яке виникає в поясах ферми від прикладених до неї зовнішніх сил;

$[\sigma]$  – допустиме напруження при розтягу (стиску) для матеріалу поясів ферми.

Для підбраного перерізу перевіряється на стійкість верхній пояс ферми при стиску з умови:

$$\frac{N_n}{\varphi A_n} \leq [\sigma], \quad (5)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт поздовжнього згину.

Значення коефіцієнта  $\varphi$  залежить від гнучкості елемента  $\lambda$ , яка може бути визначена за формулою:

$$\lambda = \frac{l_{np}}{i}, \quad (6)$$

де  $l_{np}$  – приведена довжина стрижня пояса, яка дорівнює:

$$l_{np} = \mu l_n, \quad (7)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт приведення довжини стрижня пояса (для двохшарнірної схеми навантаження  $\mu = 1$ );

$l_n$  – довжина стрижня пояса;

$i$  – радіус інерції перерізу елемента.

Поперечний переріз розкосів підбирається з умови їхньої міцності:

$$A_p = \frac{P}{\sin \alpha [\sigma]}, \quad (8)$$

де  $P$  – зовнішнє вузлове навантаження;

$\alpha$  – кут нахилу розкосу.

Стиснені розкоси додатково розраховуються на стійкість:

$$\frac{P}{\sin \alpha \varphi A_p} \leq [\sigma]. \quad (9)$$

Формується матриця коефіцієнтів рівнянь рівноваги у вигляді (10).

Формується матриця внутрішньої піддатливості (11) з виразу для потенціальної енергії внутрішніх сил за наявності пружно-піддатливих опор.

Реалізуючи матричний метод розрахунку пружних стрижневих систем, знаходимо шукані прогини трубопроводу і виникаючі внутрішні силові фактори (згинальні моменти та реакції пружно-піддатливих опор).

Перевіряємо міцність трубопроводу на дію максимального згинального моменту за формулою (12).

$$A = - \begin{vmatrix} l_1^{-1} + l_2^{-1} & -l_2^{-1} & 0 & \cdot & 0 & 1 & \cdot & 0 \\ -l_2^{-1} & l_2^{-1} + l_3^{-1} & -l_3^{-1} & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & -l_3^{-1} & l_3^{-1} + l_4^{-1} & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & -l_4^{-1} & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -l_{n-1}^{-1} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -l_{n-1}^{-1} & l_{n-1}^{-1} + l_n^{-1} & 0 & \cdot & 1 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

$$B = \begin{vmatrix} \frac{l_1 + l_2}{3EI} & \frac{l_2}{6EI} & 0 & \cdot & 0 & 1 & \cdot & 0 \\ \frac{l_2}{6EI} & \frac{l_2 + l_3}{3EI} & \frac{l_3}{6EI} & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & \frac{l_3}{6EI} & \frac{l_3 + l_4}{3EI} & \cdot & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{l_{n-1}}{6EI} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{l_{n-1}}{6EI} & \frac{l_{n-1} + l_n}{3EI} & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_1^{-1} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_n^{-1} \end{vmatrix}. \quad (11)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{noz(P)} + \sigma_{32} \leq R_2, \quad (12)$$

де  $\sigma_{noz(P)}$  – поздовжні напруження від внутрішнього тиску;

$\sigma_{32}$  – напруження від згину, які дорівнюють:

$$\sigma_{32} = \frac{M}{W}, \quad (13)$$

де  $M$  – згинальний момент в трубопроводі в точці опори на ферму;

$W$  – осьовий момент опору поперечного перерізу труби;

$R_2$  – розрахунковий опір трубної сталі розтягу (стиску).

Покажемо можливість прокладання через водну перешкоду балкового трубопровідного переходу з компенсаторами з підтримуючим елементом у вигляді ферми, яка виключає використання проміжних опор.

Вихідні дані для розрахунку: зовнішній діаметр газопроводу  $D_3 = 1420$  мм; номінальна товщина стінки газопроводу  $\delta_n = 18,7$  мм; осьовий момент інерції поперечного перерізу трубопроводу  $I = 0,0202 \text{ м}^4$ ; осьовий момент опору поперечного перерізу труби  $W = 0,02845 \text{ м}^3$ ; матеріал трубопроводу – сталь 10Г2ФБ; розрахунковий опір трубної сталі розтягу (стиску)  $R_2 = 327$  МПа; модуль пружності матеріалу трубопроводу  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; робочий тиск в трубопроводі  $P_{роб} = 7,5$  МПа; коефіцієнт надійності за навантаженням від внутрішнього тиску  $n_p = 1,1$ ; повне розрахункове навантаження на трубопровід  $q_{mp} = 9407 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ;

довжина переходу  $L_{nep} = 102$  м; висота ферми – 3 м; ширина ферми – 2,02 м; кут нахилу розкошу  $\alpha = 45^\circ$ ; довжина стержня розкошу  $l_p = 4,242$  м; довжина стержня пояса  $l_n = 6$  м; матеріал ферми – сталь конструкційна вуглецева звичайної якості Ст3; допустиме напруження при розтягу (стиску) для матеріалу поясів ферми  $[\sigma] = 230$  МПа.

Прийmemo, що трубопровід на ферму обпирається в чотирьох точках – в граничних перерізах і на дві пружно-піддатливі опори в прогоні з жорсткостями  $\beta_1$  та  $\beta_2$  (рис. 5). Зовнішнє вузлове навантаження, яке діє на одну половину підтримуючої ферми, визначається шляхом приведення розрахункового розподіленого навантаження на опорні вузли:

$$P = \frac{q_{mp} L_{nep}}{2} = \frac{9407 \cdot 102}{2} = 479757 \text{ Н}.$$

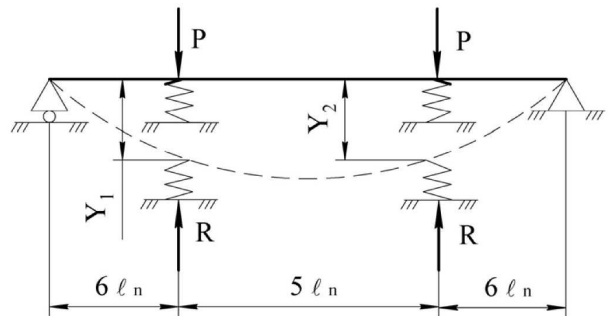


Рисунок 5 – Розрахункова схема трубопровідного переходу

На рисунку 6 представлені вантажна і одинична розрахункові схеми ферми.

Використовуючи формулу (3) знаходимо прогини ферми в табличній формі (таблиця 1).

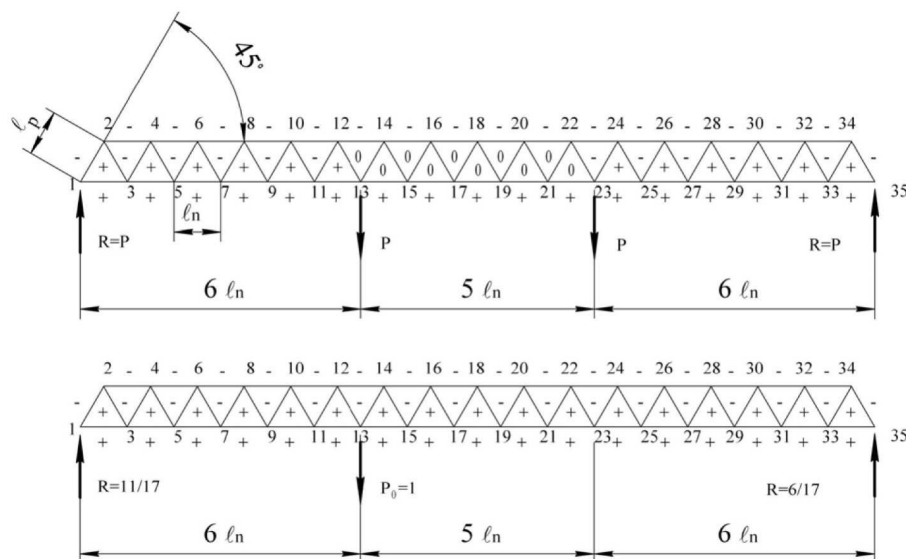


Рисунок 6 – Вантажна і одинична розрахункові схеми ферми

Таблиця 1 – Визначення прогинів в точках обпирання трубопроводу на ферму

Найменування стрижня	$l_i$	$A_i$	$N_n^i$	$N_{od}^i$	$\frac{N_n^i N_{od}^i l_i}{E_i A_i}$
1	2	3	4	5	6
$N_{1-2}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{1-3}$	$l_n$	$A_n$	$P \operatorname{ctg} \alpha$	$\frac{11 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{11Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{2-3}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{2-4}$	$l_n$	$A_n$	$-2P \operatorname{ctg} \alpha$	$-\frac{22 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{44Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{3-4}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{3-5}$	$l_n$	$A_n$	$3P \operatorname{ctg} \alpha$	$\frac{33 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{99Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{4-5}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{4-6}$	$l_n$	$A_n$	$-4P \operatorname{ctg} \alpha$	$-\frac{44 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{176Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{5-6}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{5-7}$	$l_n$	$A_n$	$5P \operatorname{ctg} \alpha$	$\frac{55 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{275Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{6-7}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{6-8}$	$l_n$	$A_n$	$-6P \operatorname{ctg} \alpha$	$-\frac{66 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{396Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{7-8}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{7-9}$	$l_n$	$A_n$	$7P \operatorname{ctg} \alpha$	$\frac{77 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{539Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{8-9}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{8-10}$	$l_n$	$A_n$	$-8P \operatorname{ctg} \alpha$	$-\frac{88 \operatorname{ctg} \alpha}{17}$	$\frac{704Pl_n \operatorname{ctg}^2 \alpha}{17EA_n}$
$N_{9-10}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{11}{17 \sin \alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$



Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
$N_{9-11}$	$l_n$	$A_n$	$9Pctg\alpha$	$\frac{99ctg\alpha}{17}$	$\frac{891Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{10-11}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin\alpha}$	$\frac{11}{17\sin\alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{10-12}$	$l_n$	$A_n$	$-10Pctg\alpha$	$-\frac{110ctg\alpha}{17}$	$\frac{1100Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{11-12}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin\alpha}$	$-\frac{11}{17\sin\alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{11-13}$	$l_n$	$A_n$	$11Pctg\alpha$	$\frac{121ctg\alpha}{17}$	$\frac{1331Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{12-13}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin\alpha}$	$\frac{11}{17\sin\alpha}$	$\frac{11Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{12-14}$	$l_n$	$A_n$	$-12Pctg\alpha$	$-\frac{132ctg\alpha}{17}$	$\frac{1584Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{13-14}$	$l_p$	$A_p$	0	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{13-15}$	$l_n$	$A_n$	$12Pctg\alpha$	$\frac{126ctg\alpha}{17}$	$\frac{1512Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{14-15}$	$l_p$	$A_p$	0	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{14-16}$	$l_n$	$A_n$	$-12Pctg\alpha$	$-\frac{120ctg\alpha}{17}$	$\frac{1440Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{15-16}$	$l_p$	$A_p$	0	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{15-17}$	$l_n$	$A_n$	$12Pctg\alpha$	$\frac{114ctg\alpha}{17}$	$\frac{1368Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{16-17}$	$l_p$	$A_p$	0	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{16-18}$	$l_n$	$A_n$	$-12Pctg\alpha$	$-\frac{108ctg\alpha}{17}$	$\frac{1296Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{17-18}$	$l_p$	$A_p$	0	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{17-19}$	$l_n$	$A_n$	$12Pctg\alpha$	$\frac{102ctg\alpha}{17}$	$\frac{1224Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{18-19}$	$l_p$	$A_p$	0	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{18-20}$	$l_n$	$A_n$	$-12Pctg\alpha$	$-\frac{96ctg\alpha}{17}$	$\frac{1152Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{19-20}$	$l_p$	$A_p$	0	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	0

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
$N_{19-21}$	$l_n$	$A_n$	$12Pctg\alpha$	$\frac{90ctg\alpha}{17}$	$\frac{1080Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{20-21}$	$l_p$	$A_p$	0	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{20-22}$	$l_n$	$A_n$	$-12Pctg\alpha$	$-\frac{84ctg\alpha}{17}$	$\frac{1008Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{21-22}$	$l_p$	$A_p$	0	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{21-23}$	$l_n$	$A_n$	$12Pctg\alpha$	$\frac{78ctg\alpha}{17}$	$\frac{936Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{22-23}$	$l_p$	$A_p$	0	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	0
$N_{22-24}$	$l_n$	$A_n$	$-12Pctg\alpha$	$-\frac{72ctg\alpha}{17}$	$\frac{864Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{23-24}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin\alpha}$	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{23-25}$	$l_n$	$A_n$	$11Pctg\alpha$	$\frac{66ctg\alpha}{17}$	$\frac{726Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{24-25}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin\alpha}$	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{24-26}$	$l_n$	$A_n$	$-10Pctg\alpha$	$-\frac{60ctg\alpha}{17}$	$\frac{600Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{25-26}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin\alpha}$	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{25-27}$	$l_n$	$A_n$	$9Pctg\alpha$	$\frac{54ctg\alpha}{17}$	$\frac{486Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{26-27}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin\alpha}$	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{26-28}$	$l_n$	$A_n$	$-8Pctg\alpha$	$-\frac{48ctg\alpha}{17}$	$\frac{384Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{27-28}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin\alpha}$	$-\frac{6}{17\sin\alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{27-29}$	$l_n$	$A_n$	$7Pctg\alpha$	$\frac{42ctg\alpha}{17}$	$\frac{294Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{28-29}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin\alpha}$	$\frac{6}{17\sin\alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p\sin^2\alpha}$
$N_{28-30}$	$l_n$	$A_n$	$-6Pctg\alpha$	$-\frac{36ctg\alpha}{17}$	$\frac{216Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5	6
$N_{29-30}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{6}{17 \sin \alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{29-31}$	$l_n$	$A_n$	$5Pctg\alpha$	$\frac{30ctg\alpha}{17}$	$\frac{150Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{30-31}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{6}{17 \sin \alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{30-32}$	$l_n$	$A_n$	$-4Pctg\alpha$	$-\frac{24ctg\alpha}{17}$	$\frac{96Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{31-32}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{6}{17 \sin \alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{31-33}$	$l_n$	$A_n$	$3Pctg\alpha$	$\frac{18ctg\alpha}{17}$	$\frac{54Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{32-33}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{6}{17 \sin \alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{32-34}$	$l_n$	$A_n$	$-2Pctg\alpha$	$-\frac{12ctg\alpha}{17}$	$\frac{24Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{33-34}$	$l_p$	$A_p$	$-\frac{P}{\sin \alpha}$	$-\frac{6}{17 \sin \alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$
$N_{33-35}$	$l_n$	$A_n$	$Pctg\alpha$	$\frac{6ctg\alpha}{17}$	$\frac{6Pl_nctg^2\alpha}{17EA_n}$
$N_{34-35}$	$l_p$	$A_p$	$\frac{P}{\sin \alpha}$	$\frac{6}{17 \sin \alpha}$	$\frac{6Pl_p}{17EA_p \sin^2 \alpha}$

Поперечний переріз нижнього пояса за формулою (4) із врахуванням максимального зусилля з таблиці 1:

$$A_n = \frac{12Pctg\alpha}{[\sigma]} = \frac{12 \cdot 479757 \cdot ctg45^\circ}{230 \cdot 10^6} = 0,025051 \text{ м}^2.$$

За сортаментом (ГОСТ 8732-78) вибираємо гарячодформовані безшовні сталеві труби  $D_3 \times \delta_n = 377 \times 25 \text{ мм}$ , для яких  $A_n = 0,027632 \text{ м}^2$  та  $i = 0,1248 \text{ м}$ .

Приведена довжина стрижня пояса за формулою (7):

$$l_{np} = 1 \cdot 6 = 6 \text{ м}.$$

Гнучкість елемента за формулою (6):

$$\lambda = \frac{6}{0,1248} = 48,09.$$

Коефіцієнт поздовжнього згину з використанням методу інтерполяції:

$$\lambda_1 = 40 \rightarrow \varphi_1 = 0,894;$$

$$\lambda_2 = 50 \rightarrow \varphi_2 = 0,852;$$

$$\varphi = \varphi_1 + \frac{(\lambda - \lambda_1)(\varphi_2 - \varphi_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} =$$

$$= 0,894 + \frac{(48,09 - 40)(0,852 - 0,894)}{50 - 40} = 0,86.$$

Перевіряємо за формулою (5) умову стійкості верхнього стисненого пояса ферми, при цьому величина зусилля  $N_n$  також береться з таблиці 1, але це значення множиться на 2, оскільки ферма трикутного перерізу є просторовою фермою і при її розрахунку був застосований метод розкладання на дві більш прості плоскі ферми:

$$\frac{24Pctg\alpha}{\phi A_n} = \frac{24 \cdot 479757 \cdot ctg45^\circ}{0,86 \cdot 0,027632} =$$

$$= 484,9 \text{ МПа} > [\sigma] = 230 \text{ МПа}.$$

Умова не виконується, тому для верхнього пояса підберемо переріз інших розмірів. Виби-

раємо гарячедеформовані безшовні сталеві труби  $D_3 \times \delta_n = 530 \times 36$  мм, для яких  $A_n = 0,055842 \text{ м}^2$  та  $i = 0,1751$  м. Знаходимо гнучкість елемента:

$$\lambda = \frac{6}{0,1751} = 34,26.$$

Знаходимо методом інтерполяції значення коефіцієнта поздовжнього згину:

$$\lambda_1 = 30 \rightarrow \varphi_1 = 0,931;$$

$$\lambda_2 = 40 \rightarrow \varphi_2 = 0,894;$$

$$\varphi = 0,931 + \frac{(34,26 - 30)(0,894 - 0,931)}{40 - 30} = 0,9152.$$

Перевіряємо умову стійкості верхнього стисненого пояса ферми:

$$\frac{24 \cdot 479757 \cdot \text{ctg} 45^\circ}{0,9152 \cdot 0,055842} = 225,5 \text{ МПа} < [\sigma] = 230 \text{ МПа}.$$

Умова виконується, тому остаточно приймаємо  $D_3 \times \delta_n = 530 \times 36$  мм.

Поперечний переріз розкосів за формулою (8):

$$A_p = \frac{479757}{\sin 45^\circ \cdot 230 \cdot 10^6} = 0,002951 \text{ м}^2.$$

За сортаментом (ГОСТ 10704-76) вибираємо електрозварні прямошовні сталеві труби  $D_3 \times \delta_n = 194 \times 5,5$  мм, для яких  $A_p = 0,003255 \text{ м}^2$  та  $i = 0,0667$  м.

Приведена довжина стрижня розкосу:

$$l_{np} = 1 \cdot 4,242 = 4,242 \text{ м}.$$

Гнучкість елемента:

$$\lambda = \frac{4,242}{0,0667} = 63,62.$$

Коефіцієнт поздовжнього згину з використанням методу інтерполяції:

$$\lambda_1 = 60 \rightarrow \varphi_1 = 0,805;$$

$$\lambda_2 = 70 \rightarrow \varphi_2 = 0,754;$$

$$\varphi = 0,805 + \frac{(63,62 - 60)(0,754 - 0,805)}{70 - 60} = 0,7865.$$

Перевіряємо за формулою (9) умову стійкості стиснутого розкосу ферми:

$$\frac{479757}{\sin 45^\circ \cdot 0,7865 \cdot 0,003255} = 265,1 \text{ МПа} > [\sigma] = 230 \text{ МПа}.$$

Умова не виконується, тому підберемо переріз інших розмірів. Вибираємо електрозварні прямошовні сталеві труби  $D_3 \times \delta_n = 203 \times 6$  мм, для яких  $A_p = 0,003711 \text{ м}^2$  та  $i = 0,0697$  м. Знаходимо гнучкість елемента:

$$\lambda = \frac{4,242}{0,0697} = 60,88.$$

Знаходимо методом інтерполяції значення коефіцієнта поздовжнього згину:

$$\lambda_1 = 60 \rightarrow \varphi_1 = 0,805;$$

$$\lambda_2 = 70 \rightarrow \varphi_2 = 0,754;$$

$$\varphi = 0,805 + \frac{(60,88 - 60)(0,754 - 0,805)}{70 - 60} = 0,8005.$$

Перевіряємо умову стійкості стисненого розкосу ферми:

$$\frac{479757}{\sin 45^\circ \cdot 0,8005 \cdot 0,003711} = 228,4 \text{ МПа} < [\sigma] = 230 \text{ МПа}.$$

Умова виконується, тому остаточно приймаємо  $D_3 \times \delta_n = 203 \times 6$  мм.

На основі таблиці 1 вирази для прогину і коефіцієнта жорсткості набудуть вигляду:

$$f_{13;23} = \left( \frac{1292}{A_{n1}} + \frac{2608}{A_{n2}} \right) \frac{Pl_n \text{ctg}^2 \alpha}{E} + \frac{24Pl_p}{EA_p \sin^2 \alpha}; \quad (14)$$

$$\beta_{13;23} = \left( \frac{A_{n1}}{1292} + \frac{A_{n2}}{2608} \right) \frac{E}{l_n \text{ctg}^2 \alpha} + \frac{EA_p \sin^2 \alpha}{24l_p}. \quad (15)$$

Для розрахункової схеми (рисунок 5) з (11) матриця внутрішньої піддатливості, отримана з виразу для потенціальної енергії внутрішніх сил, матиме вигляд:

$$B = \begin{vmatrix} \frac{11l_n}{3EI} & \frac{5l_n}{6EI} & 0 & 0 \\ \frac{5l_n}{6EI} & \frac{11l_n}{3EI} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta^{-1} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Матриця коефіцієнтів рівнянь рівноваги з (10):

$$A = - \begin{vmatrix} \frac{11}{30l_n} & -\frac{1}{5l_n} & 1 & 0 \\ \frac{1}{5l_n} & \frac{11}{30l_n} & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Транспонована матриця коефіцієнтів рівнянь рівноваги:

$$A^T = - \begin{vmatrix} \frac{11}{30l_n} & -\frac{1}{5l_n} \\ \frac{1}{5l_n} & \frac{11}{30l_n} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Обертаючи матрицю  $B$ , отримуємо матрицю внутрішньої жорсткості:

$$C = B^{-1} = \frac{EI}{153l_n} \begin{vmatrix} 44 & -10 & 0 & 0 \\ -10 & 44 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{153l_n\beta}{EI} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{153l_n\beta}{EI} \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Виконавши операції над матрицями (17) – (19), знаходимо матрицю зовнішньої жорсткості за формулою:

$$R = A \times C \times A^T = \frac{EI}{68850l_n^3} \begin{vmatrix} 4114+k & -3689 \\ -3689 & 4114+k \end{vmatrix}, \quad (20)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який дорівнює:

$$k = \frac{68850l_n^3\beta}{EI}. \quad (21)$$

Матриця зовнішньої піддатливості матиме вигляд:

$$L = R^{-1} = \frac{68850l_n^3}{EI(k^2 + 8224k + 3316275)} \times \begin{vmatrix} 4114+k & 3689 \\ 3689 & 4114+k \end{vmatrix}. \quad (22)$$

За формулою (15) коефіцієнт жорсткості дорівнює:

$$\beta = \left( \frac{0,027632}{1292} + \frac{0,055842}{2608} \right) \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{6 \cdot \text{ctg}^2 45^\circ} + \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,003711 \cdot \sin^2 45^\circ}{24 \cdot 4,242} = 5320370 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Знаходимо коефіцієнт  $k$  за формулою (21):

$$k = \frac{68850 \cdot 6^3 \cdot 5320370}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0202} = 18652.$$

З формули (22) визначаємо вектори прогинів трубопроводу в точках обпирання на ферму:

$$Y_1 = Y_2 = \frac{68850l_n^3 q_{mp} L_{nep} (7803+k)}{EI(k^2 + 8224k + 3316275)} = \frac{68850 \cdot 6^3 \cdot 9407 \cdot 102 (7803+18652)}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0202 \cdot (18652^2 + 8224 \cdot 18652 + 3316275)} = 0,176 \text{ м}.$$

Виконавши операції над матрицями (18), (19) і (22), визначаємо внутрішні силові фактори за формулою:

$$\bar{N} = -C \times A^T \times L = \frac{1}{k^2 + 8224k + 3316275} \times \begin{vmatrix} (12874950 + 8160k)l_n & (7022700 - 5610k)l_n \\ (7022700 - 5610k)l_n & (12874950 + 8160k)l_n \\ (4114+k)k & 3689k \\ 3689k & (4114+k)k \end{vmatrix}.$$

З формули (23) знаходимо згинальні моменти в трубопроводі в точках обпирання на ферму:

$$M_1 = M_2 = \frac{(19897650 + 2550k)l_n q_{mp} L_{nep}}{k^2 + 8224k + 3316275} = \frac{(19897650 + 2550 \cdot 18652) \cdot 6 \cdot 9407 \cdot 102}{18652^2 + 8224 \cdot 18652 + 3316275} = 769650 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Поздовжні напруження від внутрішнього тиску в прямолінійному надземному трубопроводі з компенсаторами:

$$\sigma_{noz(P)} = \frac{n_p P_{роб} D_v}{4\delta_n} = \frac{1,1 \cdot 7,5 \cdot 10^6 \cdot 1,3826}{4 \cdot 0,0187} = 152,5 \text{ МПа}.$$

Напруження від згину за формулою (13):

$$\sigma_{зг} = \frac{769650}{0,02845} = 27,1 \text{ МПа}.$$

Перевіряємо умову міцності (12):

$$\sigma_{\max} = 152,5 + 27,1 = 179,5 \text{ МПа} < R_2 = 327 \text{ МПа}.$$

Бачимо, що міцність трубопроводу забезпечується.

Якщо трубопровід всередині ферми буде обпиратися більш ніж в двох точках, то кількість пружно-піддатливих опор при розрахунку за запропонованою методикою буде відповідати кількості точок обпирання. В цьому випадку лише збільшиться порядок матриць і зміниться коефіцієнт жорсткості  $\beta$ .

## Висновки

Запропоновано методику оцінки напружено-деформованого стану балкових систем надземних трубопроводних переходів із підтримуючим елементом робочого трубопроводу у вигляді ферми, в якій в якості розрахункової схеми трубопровід запропоновано розглядати як нерозрізну багатопрогінну балку, яка обпирається в прогоні на пружно-піддатливі опори. Показано, що наявність ферми, яка має переріз у вигляді рівнобедреного трикутника, при достатній горизонтальній жорсткості дозволяє збільшити довжину прогону, який перекривається, в 2-3 рази без влаштування проміжних опор.

*Література*

1. Сварочно-монтажные работы в трубопроводном строительстве : учеб. пособие для вузов / А. Ф. Суворов и др. Москва: ЗАО “Звезда”, 2006. 240 с.
2. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие / Л.И. Быкови др. Санкт-Петербург: Недра, 2006. 824 с.
3. Дорошенко Я. В. Спорудження магістральних трубопроводів: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. 563 с.
4. Дорошенко Я. В. Спорудження та ремонт зосереджених об’єктів газонафтопроводів: підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 845 с.
5. ISO 13623:2017. Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems. Third edition. Geneva, 2017. 84 p.
6. API Specification 5L. Line Pipe. 46th Edition. Washington : American Petroleum Institute, 2018. 205 p.
7. ASME B31.8-2018. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. New York : The American Society of Mechanical Engineers, 2018. 206 p.
8. ASME B31.4-2019. Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. New York : The American Society of Mechanical Engineers, 2019. 138 p.

*References*

1. Svarochno-montazhnyie raboty v truboprovodnom stroitelstve : ucheb. posobie dlya vuzov / A. F. Suvorov i dr. Moskva: ZAO “Zvezda”, 2006. 240 p. [in Russian]
2. Tipovyye raschetyi pri sooruzhenii i remonte gazonefteprovodov: ucheb. posobie / L.I. Byikovi dr. Sankt-Peterburg: Nedra, 2006. 824 p. [in Russian]
3. Doroshenko Ya. V. Sporudzhennia mahistralnykh truboprovodiv: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2009. 563 p. [in Ukrainian]
4. Doroshenko Ya. V. Sporudzhennia ta remont zoseredzhenykh obiektiv hazonaftoprovodiv: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk : IFNTUNH, 2015. 845 p. [in Ukrainian]
5. ISO 13623:2017. Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems. Third edition. Geneva, 2017. 84 p.
6. API Specification 5L. Line Pipe. 46th Edition. Washington : American Petroleum Institute, 2018. 205 p.
7. ASME B31.8-2018. Gas Transmission and Distribution Piping Systems. New York : The American Society of Mechanical Engineers, 2018. 206 p.
8. ASME B31.4-2019. Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. New York : The American Society of Mechanical Engineers, 2019. 138 p.