

МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ «ШАХТНИЙ ГАЗОПРОВІД – ГІРНИЧА ВИРОБКА»

*Л. Н. Ширін, Р. Р. Єгорченко**

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;
49000; м. Дніпро, проспект Д. Яворницького, 19; тел. +380663833166,
e-mail: kikerovich@gmail.com, shyrin.l.n@ntu.one*

Мета статті полягає у моделюванні умов взаємодії елементів системи «шахтний газопровід – гірнична виробка» («ШГ – ГВ») для встановлення зон еквівалентних деформацій та напружень у лінійних частинах дегазаційних газопроводів, які визначають їх технічний стан і пропускну здатність. Для досягнення поставленої мети проведено експертну оцінку існуючих підходів щодо моделювання шахтних дегазаційних трубопроводів, що споруджуються в пластових підземних виробках з породами підшоши, схильними до здимання. За результатами планових маркшейдерських замірів технічного стану пластових підготовчих виробок встановлено потенційно небезпечні зони деформацій гірського масиву та показники зміни просторового положення дільничних дегазаційних газопроводів. За результатами діагностики технічного стану шахтних газопроводів та досліджень умов взаємодії його з гірничим масивом було встановлено, що в зонах фланцевих з'єднань його ланцюгів під впливом деформацій гірського масиву утворюються прогини трубопроводу і, як наслідок, зони скупчення води, інтенсивної корозії внутрішніх стінок труб та механічних відкладів із вугільного і породного ґиу. Отримано фактичні данні про величини деформації порід підшоши виробок та моделювання технічного стану шахтного дегазаційного трубопроводу із застосуванням програмного комплексу SolidWorks. Встановлено особливості взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «ШГ – ГВ» та запаси їх міцності для характерних ділянок газопроводу. Експериментально підтверджено, що до дії деформації гірського масиву та механічних руйнувань найбільш схильні стикові з'єднання ланок шахтного газопроводу, що провокує зниження пропускну здатності газопроводу і потребують розробки нових технічних рішень щодо його модернізації. Обґрунтовано нові підходи щодо діагностики технічного стану шахтного дегазаційного газопроводу (ШДС) у складних гірничо-геологічних умовах розробки газоносних вугільних пластів шляхом моделювання у просторі й часі транспортно-технологічної системи «шахтний газопровід – гірнична виробка». Встановлено потенційно небезпечні зони зміни висотного положення траси шахтного дегазаційного газопроводу в залежності від деформацій гірського масиву в дільничних підготовчих виробках. Інноваційні технічні рішення щодо діагностики дегазаційних газопроводів плануються впровадити на шахтах України, що розробляють газоносні вугільні пласти, для удосконалення методик діагностування та моніторингу діючих ШДС.

Ключові слова: дегазація; шахтна дегазаційна система; метаноповітряна суміш; проєктний профіль.

The purpose of the paper is to simulate interaction between the components of mine pipeline-mine working («MP-MW») system to determine zones of equivalent deformations and stresses within the linear shares of degassing pipelines determining their technical condition and output. To achieve the purpose, an expert appraisal has been conducted to evaluate the available approaches as for the simulation of degassing pipelines being constructed within the in-seam underground mine workings where bottom rocks are prone to heaving. Routine surveying of engineering conditions of the in-seam development mine workings has helped identify potentially dangerous zones of the rock mass deformation as well as indices of changes in spatial location of the areal degassing pipelines. Diagnostics of technical state of mine pipeline as well as conditions of interaction with rock mass has helped identify that within the flanged pipe joints of its sections and under the influence of the rock mass deformation, the pipeline deflections take place; consequently, water accumulation happens as well as intensive corrosion of the internal pipe walls along with mechanical depositions of coal and rock dust. The obtained actual data on the bottom rock deformation as well as simulation of technical state of a mine degassing pipeline with the help of SolidWorks software has made it possible to define features of interaction between the «MP-MW» transportation and processing system components inclusive of their safety for the specific sections of the pipeline. It has been substantiated experimentally that joints of a mine gas pipeline are the most prone to rock mass deformation as well as disintegration. The abovementioned provokes decrease in the gas pipeline output involving new engineering solutions as for its modernization. New approaches have been substantiated concerning diagnostics of technical state of a mine degassing pipeline (MDP) under the complicated mining and geological conditions of gasiferous coal seam extraction by means of spatial and temporal simulation of the mine pipeline-mine working transportation

and processing system. Potentially dangerous zones of high-altitude position of the mine degassing pipeline route have been identified depending upon the rock mass deformations within the sectional development mine workings. It is scheduled to implement innovative engineering solutions, concerning diagnostics of technical state of mine degassing pipelines, in Ukrainian mines, extracting gasiferous coal seams, to improve diagnosing and monitoring methods for operating MDPs.

Keywords: degassing; mine degassing system; methane-air mixture; grade line.

Вступ

Одним з ключових чинників, що негативно впливають на експлуатаційну надійність шахтних дегазаційних газопроводів, споруджених в підземних гірничих виробках, є зміна їх просторового положення під впливом деформацій гірського масиву. Трансформація проектного профілю траси підземних газопроводів у просторі призводить до порушення стикових з'єднань металевих труб, що провокує приплив шахтного повітря, а з ним вугільного і породного пилу.

Експериментально доведено, що дегазаційні газопроводи, прокладені в дільничних пластових виробках, піддаються значно більшим просторовим деформаціям порівняно з магістральними, але за відсутності спеціальних заходів щодо моніторингу і підтримки їх технічного стану експлуатуються без ремонту.

Дослідженнями режимів роботи шахтних дегазаційних систем [1] було встановлено, що в умовах інтенсифікації гірничих робіт технічний стан дільничних газопроводів і параметри шахтного середовища необхідно розглядати як взаємодіючу транспортно-технологічну систему «шахтний газопровід – гірничка виробка» («ШГ – ГВ»).

На даний період параметри взаємодії елементів технологічної системи «ШГ – ГВ» не достатньо досліджені, тому проблеми оперативного контролю технічного стану дільничних газопроводів і визначення їх пропускної здатності в реальних умовах шахтного середовища вимагають виконання спеціальних шахтних спостережень та теоретичних досліджень для встановлення максимальних напружень і деформацій в лінійних частинах трубопроводу та його вузлових з'єднаннях. З огляду на це, нетрадиційна для галузі технічна задача вперше розглядається шляхом моделювання умов взаємодії елементів системи «ШГ – ГВ» із взаємосуванням методів математичного аналізу технічних систем та програмного комплексу SolidWorks.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Аналіз подібних досліджень в суміжних галузях промисловості [2, 3, 4] свідчить, що умови взаємодії з ґрунтом підземних магістра-

льних газопроводів є найважливішим показником їх експлуатаційної надійності.

У нафтогазовій галузі під час прокладання трубопроводів у ґрунтах із низьким опором та скупченнями води для зниження негативного впливу деформацій підосви на просторове положення труб використовують обважнювачі як засоби їх баластування. Однак на багатьох ділянках (особливо в північних районах), де застосовуються обважнювачі, проектні профілі трас експлуатованих трубопроводів все ж змінюють своє просторове положення з утворенням вертикальних і горизонтальних вигинів.

В роботах [5, 6] розглядаються поздовжні переміщення лінійних ділянок трубопроводу з низьким опором ґрунту в перпендикулярному напрямку, що призводить до виникнення критичного рівня напружено-деформованого стану (НДС) в трубопроводі, зниження його експлуатаційної надійності і, навіть, руйнування. Слід зазначити, що магістральні трубопроводи, прокладені підземним способом, схильні до деформацій внаслідок просідання ґрунту і до утворення зони прогину труб. Значення НДС газопроводів залежить від коефіцієнта пружності порід ґрунту і згинальної жорсткості труби [7].

Просторові зміни трас шахтних дегазаційних газопроводів, що споруджуються в підземних виробках, кардинально відрізняються від магістральних трубопроводів нафти і природного газу тим, що деформується вони в результаті конвергенції порід, що вміщують гірничі виробки, та здимання порід підосви.

В опублікованих інформаційних джерелах особливості впливу подібних явищ на технічний стан дегазаційних газопроводів не описані. Не розглянуті також умови взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «ШГ – ГВ», процеси розвитку деформацій у шахтних дегазаційних трубопроводах та негативні наслідки, що виникають в процесі викривлення їх у профілі та плані.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

У фундаментальних дослідженнях експлуатаційних параметрів шахтних дегазаційних систем [8, 9] відзначається, що для роботи установки з найменшими втратами по розрідженню, створюваному вакуум-насосами, дега-

заційний трубопровід повинен мати мінімальний гідравлічний опір трубопровідної мережі, а щоб уникнути потрапляння повітря в трубопровід з атмосфери гірничих виробок та скупчень води – якісну герметизацію фланцевих з'єднань ланок труб, прямолінійність траси з відповідними її ухилами. За результатами досліджень технічного стану діючих транспортно-технологічних систем «ШГ – ГВ» [1] встановлено, що під впливом деформацій гірського масиву в місцях фланцевих з'єднань ланцюгів дегазаційних труб трубопровід прогинається, і в місцях прогину виникають зони скупчення води та механічних відкладів вугільного і породного пилю, що провокує зниження пропускної здатності газопроводу. У зв'язку з цим основними вимогами до експлуатованих шахтних дегазаційних газопроводів [10], є необхідність витримання проєктного профілю траси, забезпечення герметичності фланцевих з'єднань труб та оперативного контролю їх технічного стану.

Мета та завдання досліджень полягає у моделюванні умов взаємодії елементів системи «ШГ – ГВ» для встановлення зон еквівалентних деформацій та напружень у лінійних частинах дегазаційних газопроводів, які визначають їх технічний стан і пропускну здатність.

Для досягнення поставленої мети було сформовано наступні задачі:

- розробити модель розвитку напружено-деформованого стану в лінійних частинах трубопроводу і програму для його розрахунку для експлуатації підземних газопроводів у складних гірничо-геологічних умовах;

- встановлення зон утворення максимальних еквівалентних деформацій шахтного газопроводу в місцях його викривлення та в вузлових з'єднаннях.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для вирішення поставлених завдань і аналізу технічного стану дегазаційних трубопроводів була сформована база вихідних даних [1], яка включає просторове положення трубопроводу, фізико-механічні властивості матеріалів трубопровідної системи, що перебувають в експлуатації, а також параметри негативних факторів, що діють на дану конструкцію.

До негативних факторів можна віднести умови, що призводять до виникнення в дегазаційному трубопроводі статичного НДС, а саме, деформації порід ґрунту, які призводять до вимушеного просторового зміщення від проєктного положення.

Основними джерелами інформації для збору вихідних даних служать проєктна, будівельна та експлуатаційна документація [10,11], результати моніторингу та діагностування технічного стану дегазаційного газопроводу, а також виконаних спеціальних досліджень особливостей деформації гірничого масиву в реальних умовах шахтного середовища [1].

Відповідно з програмою комплексних досліджень для отримання вихідної інформації потрібно виконати аналіз НДС як всієї трубопровідної системи, так і окремих її елементів, оцінити реальну міцність найбільш навантажених ділянок та визначити відповідність розрахункових запасів міцності цих ділянок відповідним нормативам.

Результати досліджень параметрів низьколегованих сталей високої міцності [12] підтверджують, що ці матеріали володіють ізотропією і деформуються в усіх напрямках однаково. Тому деформації матеріалу сталевих труб в процесі просторової зміни траси шахтного дегазаційного газопроводу розглядалися ідентично, але з урахуванням впливу поведінки масиву гірничих порід.

Для формування вихідних даних про характер поведінки елементів системи «ШГ – ГВ» в реальних умовах шахтного середовища та аналізу НДС дегазаційного газопроводу була прийнята лінійно-пружна модель матеріалу труб, а параметри пружних властивостей матеріалу (G) описані стандартними технічними характеристиками, такими як модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона [13]:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (1)$$

де E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона.

Сформований банк даних дозволив дати критичну оцінку рівня навантажень, вплив яких призводить до пластичної деформації та руйнування цілісності трубопровідної конструкції.

У фундаментальних дослідженнях [13,14] для опису моделей деформацій дегазаційного трубопроводу і практичних розрахунків застосовують гіпотезу про енергію формозміни Губера-Мізеса. У декартовій системі координат x, y, z інтенсивність напружень визначається залежністю:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – компоненти тензора напружень.

Згідно з (2) еквівалентні напруження, що виникають у лінійних частинах трубопроводу, зумовлюють перехід матеріалу в пластичний стан і при ($\sigma_i = \sigma_T$) досягають межі плинності, а при ($\sigma_i = \sigma_m$) межі міцності, що провокує руйнування конструкції.

Таким чином, дана модель пластичності може бути успішно використана як критерій при визначенні граничних станів і руйнувань трубопровідних конструкцій.

Для математичного моделювання умов взаємодії системи «ШГ – ГВ» дегазаційний трубопровід подають у вигляді стрижня довжиною L , закріпленого з двох сторін і прикладеним навантаженням (F). Енергія деформацій трубопроводу буде визначатися залежністю:

$$\delta V = \frac{1}{2} EI \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \delta x, \quad (3)$$

де E – модуль пружності;

I – момент інерції перерізу труби.

Потенційна енергія вигнутого стрижня визначається виразом:

$$V = U - \frac{1}{2} F \int_0^l \varphi^2 dx, \quad (4)$$

де U – потенційна енергія деформацій;

F – стискаюча сила.

Головною складовою навантаження (P) є поздовжнє переміщення, викликане динамічним навантаженням при взаємодії шахтного газопроводу з масивом гірничих порід на стадії утворення вигину.

Прояви вигину труб, укладених на підшви підземної виробки, та виникаючі в них поздовжні навантаження розглядалися як результат взаємодії трубопроводу з масивом гірських порід. У типових умовах експлуатації шахтних дегазаційних трубопроводів переміщення $u(x)$ має задовольняти рівняння поздовжньо-поперечного вигину та визначається залежністю:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{\pi D_1 k_n}{ES} = \frac{dP}{dx}, \quad (5)$$

де D_1, k_n – коефіцієнти, що характеризують пружні властивості ґрунту [15];

x – відстань від початку ділянки трубопроводу;

S – площа газопроводу.

Дія пружної основи поперек трубопроводу може бути змодельована пружинною підкладкою, яка чинить опір поперечним переміщенням (w).

Енергія деформацій вигину ε_D визначається залежністю:

$$\varepsilon_D = \frac{1}{2} EI \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx, \quad (6)$$

потенційна енергія стискаючого навантаження:

$$U_D = -\frac{1}{2} P \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx, \quad (7)$$

енергія деформацій пружної основи:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2} K \int_0^L w^2 dx, \quad (8)$$

де K – жорсткість основи.

Попередніми дослідженнями [1] встановлено, що в результаті деформацій гірського масиву відбуваються просторові зміни траси шахтного газопроводу та його геометричної форми, що призводить до розгерметизації системи, міграції шахтного повітря, вугільного та породного пилу і, як наслідок, до зниження пропускної здатності газопроводу.

Слід зауважити, що умови взаємодії елементів технологічної системи «ШГ – ГВ» є малодослідженою проблемою гірничого виробництва і вимагають проведення спеціальних досліджень для встановлення максимальних напружень і деформацій в лінійних частинах газопроводу та його вузлових з'єднаннях. У зв'язку з цим подальший розгляд нетрадиційної для галузі технічної задачі виконувалося шляхом моделювання умов взаємодії елементів системи «ШГ – ГВ» з використанням програмного комплексу SolidWorks.

Відповідно до розробленої методики програмного моделювання режимів роботи ШДС, отримані за результатами маркшейдерської зйомки висотні позначки профілю газопроводу послужили базою для моделювання лінійних деформацій трубопроводу під впливом здиблених порід підшви.

В процесі моделювання деформована ділянка газопроводу та гірничка виробка в програмі SolidWorks розглядаються комплексно. Використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ) [16], програма дозволила виконати структурний аналіз поведінки системи при конвергенції масиву гірських порід та прогнозувати технічний стан газопроводу в реальних умовах шахтного середовища. Програмою та методикою досліджень передбачено також шляхом віртуального тестування, отриманих за результатами маркшейдерської зйомки профілів деформованих ділянок шахтного газопроводу, та сформованих за ними CAD-моделей, встановити гранично допустимі напруження в стикових з'єднаннях трубопроводу для найбільш викривлених ділянок траси.

Модельована ділянка, викривленої в профілі траси дегазаційного трубопроводу, складається з шести ланок труб довжиною 4,0 м, діаметром 300 мм і товщиною стінки 4,0 мм. Труби для дегазації, що постачаються шахтам, виготовлені з простої вуглецевої сталі без спеціального покриття. Фізико-механічні властивості матеріалу дегазаційних труб, що розглядаються в сформованих САД-моделях, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні властивості вуглецевої сталі

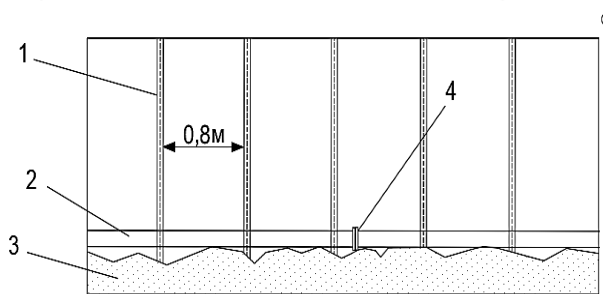
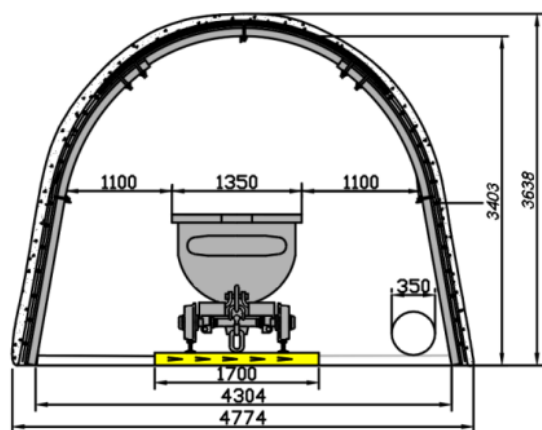
| Властивості | Значення | Одиниці вимірювання |
|---------------------------------|-----------|---------------------|
| Модуль пружності | 2,1e+11 | Н/м ² |
| Модуль зсуву | 7,9e+10 | Н/м ² |
| Масова щільність | 7800 | кг/м ³ |
| Межа міцності при розтягуванні | 399826000 | Н/м ² |
| Коефіцієнт Пуассона | 0,28 | |
| Межа плинності | 220594000 | Н/м ² |
| Коефіцієнт теплового розширення | 1,3e-0,5 | |
| Теплопровідність | 43 | W/(м·К) |
| Питома теплоємність | 440 | Н/м ² |

Для моделювання умов взаємодії елементів технічної системи «ШГ – ПВ» в середовищі САПР за еталон було прийнято прямолінійну ділянку траси підземного газопроводу, змонтованого на підшві експлуатованої підземної виробки рис. 1.

За результатами оцінки технічного стану шахтних дегазаційних газопроводів було встановлено, що найбільш схильними до деформацій ділянками є стикові з'єднання. Відповідно до фактичних даних ділянки стикових з'єднань газопроводу були розбиті на два взаємопов'язані елементи – відрізки труб з фланцями на кінцях (рис.2). За допомогою (МСЕ) зона стикового з'єднання відрізків сталевих труб була розбита на поелементну сітку для розрахунку навантажень і деформацій в характерних її вузлах.

В представленій моделі для встановлення навантажень і параметрів зміни профілю траси дегазаційного газопроводу були використані реальні показники переміщення порід підшви гірничих виробок.

На рис. 3 наведено висотні зміщення у вузлових з'єднаннях дегазаційного газопроводу в програмному комплексі SolidWorks.



1 – стійка рамного кріплення; 2 – сталевий дегазаційний трубопровід; 3 – підшва гірничої виробки; 4 – стикове з'єднання труб

Рисунок 1 – Дегазаційних газопровід, змонтований на підшві виробки

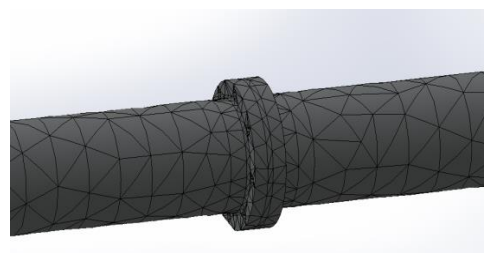


Рисунок 2 – САД-модель розбиття стикового з'єднання труб на тетрадральні елементи

Використання програмного комплексу SolidWorks для моделювання технічного стану шахтного дегазаційного трубопроводу дало змогу встановити еквівалентні напруження, максимальні деформації в лінійних частинах газопроводу, а також зони еквівалентних деформацій у вузлових з'єднаннях та показники запасу міцності газопроводу в реальних умовах шахтної середовища. В програмному комплексі SolidWorks [16] нормальні напруження σ_x , σ_y та σ_z визначаються як SX, SY та SZ, тому при визначенні еквівалентних напружень (напруження Von Mises), вони означені відповідно до оригіналу.

На рис. 4 відображено еквівалентні напруження, що виникають у вузлових з'єднаннях шахтного газопроводу в результаті деформу-

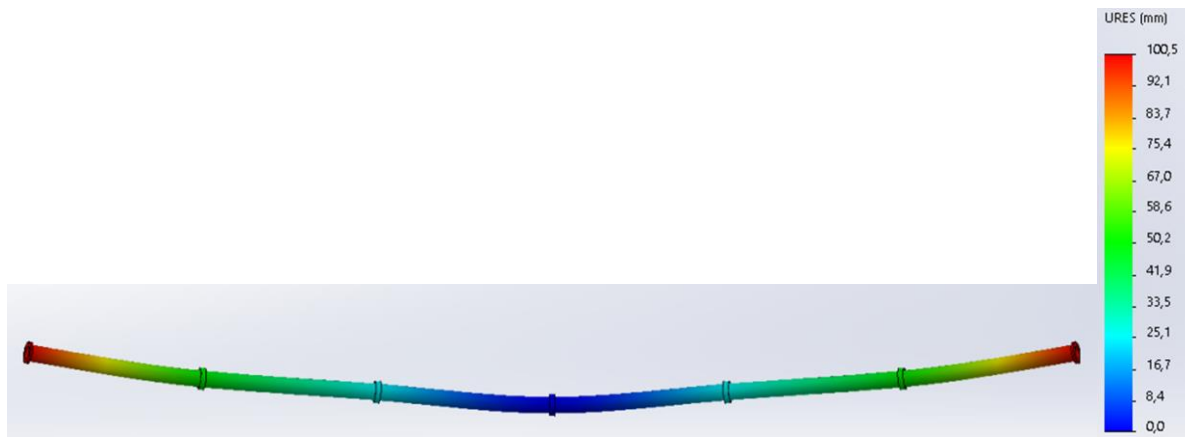


Рисунок 3 – Висотні зміщення у вузлових з'єднаннях дегазаційного газопроводу

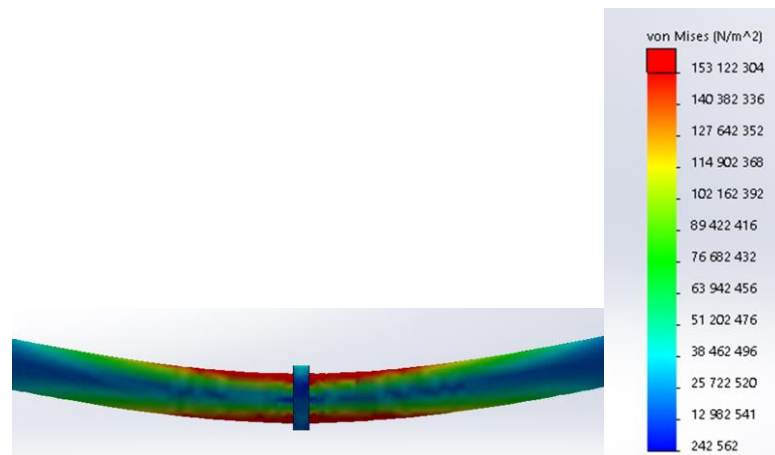


Рисунок 4 – Еквівалентні напруження шахтного газопроводу

вання порід підшови виробки. Отримані еквівалентні напруження надають інформацію, достатню для оцінки надійності конструкції для багатьох пластичних матеріалів.

Наведені на рис. 4 напруження von Mises обчислюються на основі шести компонентів:

$$VON = \{0,5 \cdot [(SX - SY)^2 + (SX - SZ)^2 + (SY - SZ)^2] + 3 \cdot (TXY^2 + TXZ^2 + TYZ^2)\}^{(1/2)}, \quad (9)$$

де VON – напруження Von Mises;
 SX – нормальне напруження по X;
 SY – нормальна напруження по Y;
 SZ – нормальна напруження по Z;
 TXY – зсув по Y в площині YZ;
 TXZ – зсув по Z в площині YZ;
 TYZ – зсув по Z в площині XZ.

Або, що еквівалентно, виходячи з трьох головних напружень:

$$VON = \{0,5 \cdot [(P1 - P2)^2 + (P1 - P3)^2 + (P2 - P3)^2]\}^{(1/2)}, \quad (10)$$

де P1 – перше головне напруження (найбільше);

P2 – друге головне напруження;
 P3 – третє головне напруження.

За результатами оцінки отриманих еквівалентних напружень встановлено, що найбільш схильними до руйнування є вузлові з'єднання шахтного дегазаційного газопроводу, напруження в яких досягають 150 МН / м², перевищуючи фізико-механічні властивості матеріалу дегазаційних труб (табл. 1).

На рис. 5 наведено характерні зони і значення еквівалентних деформацій у вузлових з'єднаннях шахтного дегазаційного газопроводу, отримані за результатами моделювання умов взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «ШГ – ПВ».

Наведені еквівалентні деформації у вузлових з'єднаннях шахтного газопроводу обчислюються, виходячи з нормальних деформацій

$$ESTRN = 2 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{3}}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_1 = 0,5 \times \quad (12)$$

$$\times [(EPSX - \varepsilon^*)^2 + (EPSY - \varepsilon^*)^2 + (EPSZ - \varepsilon^*)^2];$$

$$\varepsilon_2 = 0,5 \times \quad (13)$$

$$\times [(GMXY)^2 + (GMXZ)^2 + (GMYZ)^2]/4;$$

$$\varepsilon^* = (EPSX + EPSY + EPSZ)/3 \quad (14)$$

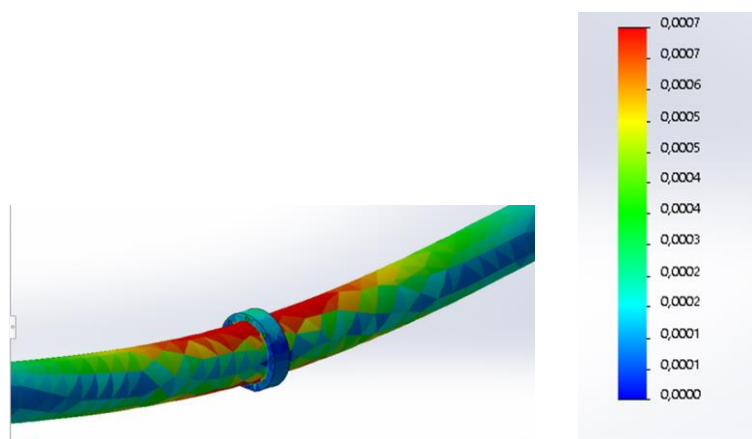


Рисунок 5 – Зони еквівалентних деформацій у вузлових з'єднаннях шахтного газопроводу

де ESTRN – еквівалентна деформація;
 EPSX – нормальна деформація по осі X;
 EPSY – нормальна деформація по осі Y;
 EPSZ – нормальна деформація по осі Z;
 GMXY – зміщення по Y в площині YZ;
 GMXZ – зміщення по Z в площині YZ;
 GMZY – зміщення по Z в площині XZ;
 ϵ_1 – нормальна деформація в першому головному напрямку;
 ϵ_2 – нормальна деформація в другому головному напрямку;
 ϵ_3 – нормальна деформація в третьому головному напрямку.

За результатами оцінки отриманих фактичних даних про величини деформацій порід підосви виробок та моделювання технічного стану шахтного дегазаційного трубопроводу із застосуванням програмного комплексу SolidWorks були встановлені особливості взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «ШГ – ГВ», а також запаси міцності характерних ділянок газопроводу і відповідність їх фізико-механічним властивостям (табл. 1). Дослідженнями умов взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «ШГ – ГВ» [1] доведено, що найбільш схильними до механічних руйнувань є стикові з'єднання ланок сталевих труб. Результати теоретичних і експериментальних досліджень стали базою для розробки рекомендацій стосовно реновації діючих дегазаційних газопроводів та методів технічного їх обслуговування в реальних умовах шахтного середовища.

Висновки

За результатами діагностики технічного стану шахтних газопроводів та досліджень умов взаємодії його з гірничим масивом було розроблено:

1) модель розвитку НДС у лінійних частинах трубопроводу та програму його розрахунку при експлуатації підземних газопроводів у складних гірничо-геологічних умовах, що дає змогу оцінити реальну міцність найбільш навантажених ділянок та визначити відповідність розрахункових запасів міцності цих ділянок відповідно нормативам;

2) комп'ютерну модель взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «ШГ – ГВ» на якій, за допомогою програмного комплексу SolidWorks, проведено чисельне моделювання режимів роботи її елементів в умовах невизначеності, отримано еквівалентні напруження та деформації в лінійних частинах експлуатованого сталевих газопроводу, а також зони максимальних деформацій у вузлових з'єднаннях його ланок.

За результатами чисельного моделювання отримано комплексний показник надійності традиційно застосованих сталевих труб при дегазації шахтного метану, який дозволяє визначити поточний стан шахтного газопроводу в реальних умовах гірничого виробництва та є орієнтиром для застосування нетрадиційних труб із композитних матеріалів.

Завдання подальших досліджень полягає у розробленні та впровадженні композитних трубопроводів у системах дегазації вугільних шахт, що є перспективним з технічної та економічної точок зору. Порівняно зі сталевими трубами пластикові мають на порядок менший коефіцієнт гідравлічного опору, що призводить до істотного зниження енергетичних витрат на транспортування метаноповітряної суміші. Крім того, вартість пластикових труб вдвічі нижча за вартість сталевих.

Література

1. Ширін Л.Н., Єгорченко Р.Р., Сергієнко М.І. Особливості діагностики технічного стану транспортно-технологічної системи «шахтний газопровід – гірнича виробка». *Геоінженерія*. 2021. Вип. 6. С. 28-37. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241823>

2. Быков Л. И., Мустафин Ф. М., Рафиков С. К. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособ. ; под общ. ред. Л. И. Быкова. СПб: Недра, 2006. 824 с.

3. Димов Л. А., Димов И. Л. О выборе способа прокладки нефтепроводов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2014. Вып. №5. С. 29–32.

4. Мазницький А. С., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Інтегральна оцінка впливу геологічних чинників щодо надійності функціонування магістрального газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород». *Містобудування та територіальне планування*. 2019. Вип. 70. С. 516-527

5. Стрілецький Ю. Й. Моніторинг положення осі трубопроводу. *Методи та прилади контролю якості*. 2008. Вип. 21. С. 48-51.

6. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Порядок визначення напружено-деформованого стану лінійних споруд в ґрунтовій основі. *Містобудування та територіальне планування*. 2011. Вип. 43. С. 516-527.

7. Чибіряков В. К., Староверов В. С., Нікітенко К. О. Розрахунок точності інженерно-геодезичних робіт при визначенні напружено-деформованого стану магістральних газопроводів. *Містобудування та територіальне планування*. Київ. 2013. Вип. 47. С. 661-666.

8. Мінеєв С.П., Пимоненко Д.М., Новіков Л.А., Слащов А.І. Деякі особливості транспортування і переробки метаноповітряної суміші на вугільних шахтах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро. 2019. Вип. 59. С. 98-107. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.098>

9. Новіков Л.А. Газодинамика обводненних участків дегазаційного трубопровода и методы расчета их параметров. *Геотехническая механика*. 2015. Вып. 120. С. 234-243.

10. Правила проектування дегазації вугільних шахт та експлуатації дегазаційних систем: СОУ-П. (2020). Міністерство енергетики України.

11. СОУ-П 10.1.00174088.018:2009 Система управління производством и охраной труда в угольной промышленности Украины (типовое

руководство): Утверждено Приказом Министерства угольной промышленности Украины от 21.01.2010 г. № 7. Киев, 2010. 200 с.

12. Касаткин Б.С., Мусияченко В.Ф. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. Киев: Техніка, 1970. 188 с.

13. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.

14. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1968. 192 с.

15. Торопов С.Ю., Дорофеев В.С., Земенков Ю.Д.. Об определении продольной силы в трубопроводе при образовании арки. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 3. С. 223-229.

16. Bethune J.D. Engineering Design and Graphics with Solid Works. *Upper Saddle River: Prentice Hall*. 2009. 552 p.

References

1. Shirin L.N., Egorchenko R.R., Sergienko M.I. Peculiarities of diagnosis of the technical condition of the transport and technological system "mining gas pipeline – mining". *Geoinjeneria*. 2021. Issue 6. P. 28-37. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241823> [in Ukrainian]

2. Bykov L. I., Mustafyn F. M., Rafykov S. K. Typical calculations for construction and repair of gas and oil pipelines. Study help. St. Petersburg: Nedra, 2006. 824 p. [in Russian]

3. Dymov L. A., Dymov I. L. On the choice of the method of laying oil pipelines during construction on permafrost soils. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2014. Issue 5. P. 29–32. [in Russian]

4. Maznytskyi A. S., Starovyerov V. S., Nikitenko K. O. Integral assessment of the influence of geological factors on the reliability of the functioning of the main gas pipeline "Urengoi-Pomari-Uzhhorod". *Urban planning and territorial planning*: 2019. Issue 70. P. 516-527 [in Russian]

5. Streletskyi Yu. Y. Monitoring the position of the axis of the pipeline. Quality control methods and devices. 2008. Issue 21. P. 48-51. [in Ukrainian]

6. Chibiryakov V.K., Starovyerov V.S., Nikitenko K.O. Procedure for determining the stress-strain state of linear structures in the soil foundation. *Urban planning and territorial planning*. 2011. Issue 43. P. 516-527. [in Ukrainian]

7. Chibiryakov V. K., Starovyerov V. S., Nikitenko K. O. Calculation of the accuracy of engineering geodetic works when determining the stress-strain state of main gas pipelines. *Urban planning and territorial planning*. 2013. Issue 47. C. 661 - 666. [in Ukrainian]
8. Mineev S.P., Pymonenko D.M., Novikov L.A., Slaschov A.I. Some features of transportation and processing of methane-air mixture in coal mines. Collection of scientific works of the National Mining University. Dnipro 2019. Issue 59. P. 98-107. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.098> [in Ukrainian]
9. Novikov L.A. Gas dynamics of flooded sections of the degassing pipeline and methods of calculating their parameters. *Geotechnical mechanics: interdisciplinary*. Sat. scientific tr. IGTM of the National Academy of Sciences of Ukraine. Dnipropetrovsk. 2015. Issue 120. P. 234-243. [in Ukrainian]
10. Rules for the design of degassing of coal mines and operation of degassing systems: SOU-P. (2020). Ministry of Energy of Ukraine. [in Ukrainian]
11. SOU-P 10.1.00174088.018:2009 System of production management and labor protection in the coal industry of Ukraine (typical manual): Approved by the Order of the Ministry of the Coal Industry of Ukraine dated January 21, 2010 No. 7. Kyiv, 2010. 200 p. [in Ukrainian]
12. Kasatkin, B.S., Musiyachenko, V.F.. Low-alloy high-strength steels for welded structures. Kyiv: Technika, 1970. 188 p. [in Russian]
13. Rabotnov Y.N. Mechanics of a deformable solid. M.: Nauka, 1988. 712 p. [in Russian]
14. Goldenblatt I.I., Kopnov V.A. Criteria of strength and plasticity of structural materials. M.: Mashinostroenie, 1968. 192 p. [in Russian]
15. Toropov S.Yu., Dorofeev V.S., Zemenkov Yu.D.. On the determination of the longitudinal force in the pipeline during the formation of an arch. *Mountain information and analytical bulletin* (scientific and technical journal). 2013. No. 3. P. 223-229. [in Russian]
16. Bethune J.D. Engineering Design and Graphics with Solid Works. Upper Saddle River: Prentice Hall. 2009. 552 p.