

Дослідження та методи аналізу

УДК 622.648: 621.867.7.8

DOI: 10.31471/1993-9973-2022-2(83)-54-62

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МЕТАНОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ ДЕГАЗАЦІЙНИМИ ГАЗОПРОВОДАМИ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Р. Р. Єгорченко, Ю. І. Оксень, Л. Н. Ширін*

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;
49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького 19, e-mail: uehorchenko.r.r@npu.one*

Моделювання умов взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «шахтний газопровід – гірнична виробка» (ШГ-ГВ) для визначення особливостей руху метаноповітряної суміші в шахтних дегазаційних трубопроводах та напрямів зниження їх гідравлічного опору й підвищення пропускної здатності є актуальною темою на даний час. Для досягнення поставленої мети необхідно провести експертну оцінку технічного стану шахтних дегазаційних газопроводів, споруджених в пластових підземних виробках, з породами підшоши, схильними до здимання, та існуючих підходів щодо визначення показників руху метаноповітряної суміші (МПС). За результатами діагностики технічного стану шахтних газопроводів та досліджень особливостей їх експлуатації в криволинійних гірничих виробках було встановлено, що в місцях фланцевих з'єднань ланцюгів трубопроводу під впливом деформацій гірського масиву утворюються прогини трубопроводу, скупчення води, механічні відкладення вугільного і породного пилу та корозія внутрішніх стінок металевих труб. Отримані фактичні данні про умови взаємодії елементів системи «шахтний газопровід – гірнична виробка» та результати моделювання її технічного стану із застосуванням програмного комплексу Solid Works Flow Simulation дозволили встановити особливості транспортування МПС деформованим шахтним дегазаційним газопроводом. Експериментально підтверджено, що негативна дія деформацій гірського масиву та механічні руйнування стикових з'єднань труб провокують зниження пропускної здатності газопроводу і потребують розроблення нових технічних рішень щодо його модернізації. Шляхом моделювання особливостей руху МПС в підземних дегазаційних трубопроводах складної конфігурації обґрунтовано нові підходи щодо зниження гідравлічного опору руху МПС дегазаційними трубопроводами та підвищення пропускної здатності транспортно-технологічної системи в специфічних умовах розробки газонасних вугільних пластів.

Ключові слова: дегазація, шахтна дегазаційна система, метаноповітряна суміш, програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation.

Моделирование условий взаимодействия элементов транспортно-технологической системы «шахтный газопровод – горная выработка» (ШГ-ГВ) для определения особенностей движения метановоздушной смеси в шахтных дегазационных трубопроводах, направлений снижения гидравлического сопротивления и повышения пропускной способности является актуальной темой в настоящее время. Для достижения поставленных целей необходимо провести экспертную оценку технического состояния шахтных дегазационных газопроводов, сооруженных в пластовых подземных выработках с породами почвы, склонными к пучению, и существующих подходов к определению показателей движения метановоздушной смеси (МВС). По результатам диагностики технического состояния шахтных газопроводов и исследований особенностей их эксплуатации в криволинейных горных выработках было установлено, что в местах фланцевых соединений

звеньев трубопровода под влиянием деформаций горного массива образуются прогибы трубопровода, скопления воды, механические отложения угольной и породной пыли и коррозия внутренних стенок стальных трубы. Полученные фактические данные об условиях взаимодействия элементов системы «шахтный газопровод – горная выработка» и результаты моделирования ее технического состояния с применением программного комплекса SolidWorks Flow Simulation позволили установить особенности транспортировки МПС по деформированному шахтному дегазационному газопроводу. Экспериментально подтверждено, что негативное действие деформаций горного массива и механические разрушения стыковых соединений труб провоцируют снижение пропускной способности газопровода и требуют разработки новых технических решений по его модернизации. Путем моделирования особенностей движения МПС в подземных дегазационных трубопроводах сложной конфигурации обоснованы новые подходы к снижению гидравлического сопротивления движению МПС по дегазационным трубопроводам и повышению пропускной способности транспортно-технологической системы в специфических условиях разработки газоносных угольных пластов.

Ключевые слова: дегазация, шахтная дегазационная система, метано-воздушная смесь, программный комплекс SolidWorks Flow Simulation.

Simulation of interaction between components of underground piping-mine working (UP-MW) transportation and technological system to identify the specificity of methane-air mixture movement through mine pipelines as well as tendencies reducing hydraulic resistance and improving capacity is topical today. For this purpose, it is required to conduct an expert appraisal of the technical condition of mine degassing lines constructed in underground development workings, where the floor tends to heave and evaluate available approaches to identify indices of the methane-air mixture (MAM) motion. Analysis of underground gas pipelines' technical conditions and their operational features within curvilinear mine workings has helped to understand the following. Under the impact of rock mass deformations, flange connections of a pipeline bend which results in water accumulation; mechanical depositions of coal and rock dust; and corrosion of inner walls of metal pipes. The obtained actual data, concerning the interaction between components of underground piping-mine working, as well as modeling results of its technical condition, using Solid Works Flow Simulation software, has made it possible to define peculiarities of MAM transportation through the deformed degassing pipeline. It has been proved experimentally that in addition to mechanical failure of pipe connections, the negative impact of rock mass deformation provokes a decrease in the pipeline capacity and needs the development of new engineering solutions concerning its upgrading. Simulation of the features of MAM transportation through degassing underground odd-shaped pipelines has helped substantiate new approaches to decrease hydraulic resistance while increasing the capacity of the transportation and technological system in the specific environment of gaseous coal seam mining.

Keywords: degassing, underground gasification system, methane-air mixture, Solid Works Flow Simulation software.

Вступ

При тривалій експлуатації стан шахтних дегазацийних трубопроводів, споруджених у підземних гірничих виробках, може суттєво змінюватися. Деформація порід гірського масиву провокує порушення стикових з'єднань труб, утворення прогинів і скупчень в них води, пилу та бруду. З часом посилюється корозія внутрішньої поверхні трубопроводу [1].

Гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови експлуатації стан шахтних дегазацийних трубопроводів постійно змінюються у часі. Відповідно змінюється технічний стан трубопроводів, особливо дільничних, тому вважаємо доцільним розглядати шахтний дегазацийний трубопровід і середовище (гірничу виробку), в якому він працює, як взаємодіючу транспортно-технологічну систему «шахтний газопровід – гірнична виробка» («ШГ–ГВ») [2].

На даний момент встановлення зміни основних технологічних параметрів транспортування МПС дегазацийними газопроводами в умовах інтенсифікації гірничих робіт є важли-

вим предметом досліджень та має велике значення при проектуванні, експлуатації та реконструкції вакуумних трубопроводів. У зв'язку з цим нетрадиційна для галузі технічна задача вперше розглядається як моделювання руху МПС у дегазацийному газопроводі складної конфігурації з використанням методів математичного аналізу та програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation.

Мета роботи – моделювання умов взаємодії елементів транспортно-технологічної системи «шахтний газопровід – гірнична виробка» (ШГ-ГВ) для визначення особливостей руху метаноповітряної суміші в шахтних дегазацийних трубопроводах та напрямів зниження їх гідравлічного опору та підвищення пропускної здатності.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

При математичному моделюванні руху газу в дільничних дегазацийних трубопроводах

[3,4] враховується вплив підсмоктування повітря та забрудненості трубопроводів на їх витратні характеристики та гідравлічний опір. Незважаючи на це, отримані результати не завжди відображають реальну картину протікання газодинамічних процесів у газопровідній мережі, що пов'язано з її топологічними особливостями, а також впливом внутрішніх та зовнішніх факторів на характер зміни газодинамічних параметрів МПС.

Фундаментальним дослідженням руху МПС у шахтних дегазаційних газопроводах присвячено роботи В.Г. Лаврика, Л.А. Склярєва, Ю.А. Цейтліна, Л.А. Новікова, В.А. Малашкіної та інших науковців.

У роботі [5] розглянуто рух МПС герметичним газопроводом постійного діаметра, вісь якого має довільну орієнтацію у просторі. Ним встановлено інтегральне рівняння, що описує зв'язок між витратою та тиском МПС у початковому та кінцевому перерізах газопроводу, а також їх залежності для його характерних ділянок. Отримані ним теоретичні залежності в подальшому були модифіковані в роботах [6] для практичних розрахунків кінцевого тиску МПС у герметичних похилих та горизонтальних ділянках газопроводу (1):

$$p_k = \left[1 - \frac{\alpha}{2} (1 - 0,448 \cdot u) \right] \times [p_n^2 - c(1 - 0,448 \cdot u) \cdot Q_o^2]^{0,5}, \quad (1)$$

де α – кут нахилу ділянки газопроводу,
 u – об'ємна концентрація метану в МПС на дільниці;

c – параметр, що визначає опір ділянки газопроводу, Па²·с²/м⁶;

Q_o – об'ємні витрати МПС, приведені до НУ, м³/с

Наведені залежності справедливі тільки для герметичних газопроводів.

Відповідно до рекомендацій [7,8,9] витрата каптованої метаноповітряної суміші та її якісні характеристики повинні визначатися з урахуванням допустимих підсосів повітря в дегазаційні свердловини і газопровід.

В реальних же умовах експлуатації шахтних дегазаційних систем (ШДС) за відсутності спеціальних дільниць з дегазації, контроль якісного складу МПС і технічного стану газопроводів покладено на службу вентиляції і техніки безпеки. Дослідженнями [2, 3] встановлено, що з пониженням глибини гірничих робіт, підвищенням метанонасиченості вугільних пластів і ускладненням у зв'язку з цим способів і засобів контролю технічного стану ШДС ділянки профілактичних робіт із техніки безпеки не можуть контролювати вплив негативних явищ гірничо-

го середовища на газодинамічні особливості руху МПС.

Експериментальними дослідженнями [10] підтверджено, що фактичні величини підсмоктування шахтного повітря та пилу значно перевищують допустимі значення, що призводить до зниження якості транспортованої метаноповітряної суміші і пропускної здатності ШДС.

Означені проблеми сьогодення потребують уточнення математичних моделей руху турбулентного потоку газів у дегазаційному трубопроводі та перегляду існуючих методик щодо розрахунків газодинамічних параметрів і технічних характеристик шахтних дегазаційних мереж.

Постановка задачі і методи дослідження

Оскільки стан дегазаційного газопроводу в шахті суттєво відрізнятиметься від його стану в лабораторних умовах (нерівномірністю розподілу нещільностей фланцевих з'єднань, утворенням прогинів трубопроводу та механічного відкладення в них води та бруду), для досягнення поставленої мети необхідно провести комп'ютерне моделювання руху МПС на ділянках реального дегазаційного газопроводу у складних гірничо-геологічних умовах.

Завдання досліджень – розробити модель руху МПС лінійними частинами шахтного дегазаційного газопроводу і програму розрахунку його експлуатаційних параметрів в умовах інтенсифікації процесів гірничого виробництва.

Основна частина

Для вирішення поставлених завдань було проведено аналіз існуючих методик математичного моделювання руху МПС дегазаційним трубопроводом та встановленню режимів роботи ДС у реальних умовах гірничого виробництва.

За результатами фундаментальних досліджень [11, 12] вперше було запропоновано математичну модель руху МПС у дегазаційному газопроводі з урахуванням підсмоктування повітря.

Кількість повітря, що підсмоктується через еквівалентну нещільність, рекомендовано розраховувати за виразом (2):

$$\Delta Q_o = G \cdot B, \quad (2)$$

де G – параметр, що визначає еквівалентну нещільність ділянки газопроводу, м³(с·Па),

B – вакуум у перерізі, в якому зосереджена еквівалентна нещільність, Па.

У свою чергу,

$$G = \frac{1}{2} b \cdot L, \quad (3)$$

де b – питомі підсмоктування повітря в газопровід (на довжині 1 м при вакуумі 1 Па), $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{Па})$.

З урахуванням результатів попередніх досліджень рух МПС в дегазаційних газопроводах можна сформулювати у вигляді системи рівнянь:

$$p_k^2 = p_n^2 - c(1 - 0,448u)Q_o^2; \quad (4)$$

$$Q_o = Q_{он} + \Delta Q_n; \quad (5)$$

$$Q_{ок} = Q_o + \Delta Q_k; \quad (6)$$

$$\Delta Q_n = G(P_{бн} - P_n); \quad (7)$$

$$\Delta Q_k = G(P_{бк} - P_k); \quad (8)$$

$$u = \frac{Q_{ом}}{Q_n}, \quad (9)$$

де $P_{бп}, P_n, Q_{оп}, \Delta Q_n$ – параметри в початковому перерізі ділянки газопроводу: барометричний тиск у виробці, Па; абсолютний тиск МПС, Па; об'ємна витрата МПС, приведена до НУ, $\text{м}^3/\text{с}$;; об'ємна витрата повітря, що підсмоктується через еквівалентну нещільність, приведена до НУ, $\text{м}^3/\text{с}$, відповідно;

$P_{бк}, P_k, Q_{ок}, \Delta Q_k$ – те саме, але в кінцевому перерізі;

$Q_{ом}$ та Q_o – об'ємні витрати відповідно метану та МПС, приведені до НУ, $\text{м}^3/\text{с}$;

U – об'ємна концентрація метану в МПС на дільниці;

C – параметр, що визначає опір ділянки газопроводу, $\text{Па}^2 \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$.

В реальних умовах шахтного середовища діючі дегазаційні газопроводи представлені криволінійною трасою, прокладеною в горизонтальних, похилих та вертикальних виробках. З метою отримання універсального виразу, придатного як для горизонтальних, так для похилих і вертикальних ділянок газопроводу, рекомендована універсальна [12] залежність:

$$p_k^2 = p_n^2 [1 - \alpha(1 - 0,448u)] - c(1 - 0,448u)Q_o^2. \quad (10)$$

Для кожної ділянки, що характеризується сталістю цих параметрів, співвідношення між тисками МПС у початковому і кінцевому перерізах може бути описано виразом (1), який, з введенням позначень, отримає спрощення:

$$\alpha_u = \alpha(1 - 0,448 \cdot u); \quad (11)$$

та

$$c_u = c(1 - 0,448 \cdot u). \quad (12)$$

Означене спрощення набуде вигляду:

$$p_k^2 = p_n^2 \cdot e^{-\alpha_u} - \frac{1 - e^{-\alpha_u}}{\alpha_u} \cdot c_u \cdot Q_o^2. \quad (13)$$

Використовуючи співвідношення (13), для послідовного з'єднання двох ділянок, отримаємо:

$$p_{k1}^2 = p_{п1}^2 \cdot e^{-\alpha_{u1}} - \frac{1 - e^{-\alpha_{u1}}}{\alpha_{u1}} \cdot c_{u1} \cdot Q_o^2; \quad (14)$$

$$p_{k2}^2 = p_{п2}^2 \cdot e^{-\alpha_{u2}} - \frac{1 - e^{-\alpha_{u2}}}{\alpha_{u2}} \cdot c_{u2} \cdot Q_o^2. \quad (15)$$

Оскільки $p_{k1} = p_{k2}$, то

$$p_{k2}^2 = p_{п1}^2 \cdot e^{-(\alpha_{u1} + \alpha_{u2})} - \left\{ \frac{c_{u1}}{\alpha_{u1}} [e^{-\alpha_{u2}} - e^{-(\alpha_{u1} + \alpha_{u2})}] + \frac{c_{u2}}{\alpha_{u2}} [1 - e^{-\alpha_{u2}}] \right\} Q_o^2. \quad (16)$$

Аналогічно, у разі послідовного з'єднання трьох ділянок, будемо мати:

$$p_{k3}^2 = p_{п2}^2 \cdot e^{-\alpha_{u3}} - \frac{1 - e^{-\alpha_{u3}}}{\alpha_{u3}} \cdot c_{u3} \cdot Q_o^2 = p_{п1}^2 \cdot e^{-(\alpha_{u1} + \alpha_{u2} + \alpha_{u3})} - \left\{ \frac{c_{u1}}{\alpha_{u1}} [e^{-(\alpha_{u2} + \alpha_{u3})} - e^{-(\alpha_{u1} + \alpha_{u2} + \alpha_{u3})}] + \frac{c_{u2}}{\alpha_{u2}} [e^{-\alpha_{u3}} - e^{-(\alpha_{u2} + \alpha_{u3})}] + \frac{c_{u3}}{\alpha_{u3}} [1 - e^{-\alpha_{u3}}] \right\} Q_o^2. \quad (17)$$

Узагальнена залежність послідовного з'єднання n ділянок матиме вигляд:

$$p_{kn}^2 = p_{п1}^2 \cdot e^{-\sum_{i=1}^n \alpha_{ui}} - Q_o^2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_{ui}}{\alpha_{ui}} [e^{-\sum_{j=i+1}^n \alpha_{uj}} - e^{-\sum_{j=i}^n \alpha_{uj}}] + \frac{c_{un}}{\alpha_{un}} [1 - e^{-\alpha_{un}}] \right\}. \quad (18)$$

Підставивши в цей вираз співвідношення (11) і (12), після перетворень отримаємо аналогічний вираз (19).

$$p_{kn}^2 = p_{п1}^2 \left[1 - (1 - 0,448 \cdot u) \sum_{i=1}^n \alpha_i \right] - Q_o^2 (1 - 0,448 \cdot u) \sum_{i=1}^n c_i. \quad (19)$$

Порівняння їх між собою показує, що послідовне з'єднання кількох ділянок газопроводу, що розрізняються кутом нахилу осі до горизонту або внутрішнім діаметром, може бути представлено у вигляді деякої еквівалентної ділянки з параметрами

$$\alpha_{посл} = \sum_{i=1}^n \alpha_i; \quad (20)$$

та

$$c_{посл} = \sum_{i=1}^n c_i. \quad (21)$$

Таким чином, уточнена математична модель руху МПС ділянкою газопровідної мережі, яка у загальному випадку може мати складний профіль і складатися з ряду послідовно з'єднаних ділянок різного прохідного перерізу, буде системою рівнянь (5)–(9) і (10). Параметри « c » цих рівнянь, що визначають, відповідно, еквівалентну нещільність та опір ділянки, розраховуються за формулами (12), (21).

Попередніми дослідженнями [1] встановлено, що в результаті неконтрольованих деформацій гірських порід, що вмщують гірничі виробки, стохастично відбуваються зміни по-

ложення траси і геометричної форми шахтного газопроводу (рис. 1), що призводить до розгерметизації системи, підосу рудникового повітря, вугільного та породного пилу. Як наслідок, в зонах стикових з'єднань і прогину труб було зафіксовано інтенсивне відкладення механічних домішок та утворення ділянок з внутрішньою корозією труб.



Рисунок 1 – Положення траси шахтного газопроводу у просторі гірничої виробки

Корозійні утворення та зростання об'єму механічних відкладень вугільного та породного пилу в зонах деформації стикових з'єднань труб дегазаційного газопроводу визначаються умовами конденсації вологи агресивного шахтного середовища.

При математичному моделюванні руху турбулентного потоку метаноповітряної суміші в дегазаційному трубопроводі використовуються диференціальні рівняння руху газу з механічними домішками [4]. Необхідність такого підходу обумовлена тим, що відкладання механічних відкладень призводить до зменшення гідравлічного перерізу газопроводу, збільшення втрат тиску в трубопроводі та, відповідно, падіння тиску на виході з нього.

Експериментальними дослідженнями технічного стану дегазаційних систем ШУ «Покровське» [2], що експлуатуються в умовах агресивних вод, були встановлені місця скупчення механічних домішок вугільного та породного пилу і зони формування корозійних ділянок трубопроводу, часткове зменшення товщини стінок металевих труб, а також наявність каверн і раковин на їх поверхні. Обумовлено це тим, що газ, який каптується з вугільного масиву, складається з вологої МПС і механічних частинок вугільного та породного пилу. Для визначення впливу складових метаноповітряних сумішей на технічний стан і витратні характеристики дільничних трубопроводів необхідно мати інформацію про концентрацію та розміри частинок пилу, а також вологість МПС.

При утворенні твердих скупчень у прогині дегазаційного поставу їх ширину та довжину можна визначити за формулами [12]:

$$b = 2\sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - h\right)^2}; \quad (22)$$

$$L = 2\sqrt{\delta + 0,5D^2 - \delta + 0,5D - h^2}, \quad (23)$$

де h – максимальна товщина скупчення, м;
 δ – радіус кривизни осі трубопроводу у місці прогину, м;

D – діаметр трубопроводу, м.

Статистичний аналіз моделей турбулентного руху МПС у шахтних трубопроводах [4] враховує міжфазні взаємодії частинок і дозволяє визначити поля швидкостей і концентрацій кожної з фаз. Розмір частинок пилу в газовому потоці при їх густині 2650 кг/м^3 може коливатися від 1 до 10 мкм. Для наближеної оцінки максимального діаметра зважених у потоці МПС частинок пилу використовують нерівність:

$$\frac{d_{\max}}{D_h} \sqrt{\left| \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right|} \cdot \sqrt{\text{Re}} \leq 0,2, \quad (24)$$

де ρ – середня густина МПС, кг/м^3 ;

Re – число Рейнольдса;

ρ_s – густина частинок, кг/м^3 ;

D_h – висота скупчень, м.

При дослідженні розподілу концентрацій завислих частинок вугільного і породного пилу на ділянках шахтної газопровідної мережі необхідно враховувати швидкість, тиск, напрямку руху потоку, густину частинок і вологість газу.

У зв'язку з цим подальші дослідження нетрадиційної для галузі технічної задачі виконувалися шляхом моделювання умов транспортування МПС у викривленому дегазаційному газопроводі з використанням програмного комплексу (ПК) SolidWorks Flow Simulation.

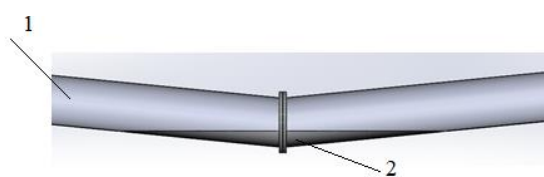
Основними етапами розробки комп'ютерної моделі у ПК SolidWorks Flow Simulation є: створення геометричної 3D моделі; побудова сітки розрахункової області; накладання граничних умов; розв'язання та візуалізація отриманих результатів.

Відповідно до розробленої методики програмного моделювання режимів роботи ШДС, отримані за результатами маркшейдерської зйомки [1] висотні позначки профілю газопроводу послужили базою для моделювання лінійних деформацій трубопроводу під впливом здіблених порід підшоши підземної виробки.

В процесі моделювання деформовані ділянки газопроводу та зони відкладення механічних домішок в програмі SolidWorks розглядалися комплексно. Застосовуючи метод скінчених об'ємів (FVM) [13], програма дозволила виконати структурний аналіз поведінки потоку МПС при транспортуванні її викривленим дегазаційним трубопроводом. Програмою та мето-

дикою досліджень передбачалось шляхом віртуального тестування профілів деформованих ділянок шахтного газопроводу, отриманих за результатами маркшейдерської зйомки, та сформованих за ними САД-моделей встановити процес утворення зон механічних скупчень в стикових з'єднаннях трубопроводу для найбільш викривлених ділянок траси.

Моделювана ділянка, викривленої в профілі траси дегазаційного трубопроводу, складалася з 4 ланок труб довжиною 4,0 м, діаметром 320 мм і товщиною стінки 4,0 мм. В деформованому стиковому з'єднанні змодельовані механічні відкладення породного та вугільного пилу, які зменшують гідравлічний переріз трубопроводу (рис. 2).



1 – дегазаційний трубопровід; 2 – механічні відкладення породного та вугільного пилу

Рисунок 2 – Фрагмент механічних відкладень породного та вугільного пилу в деформованих місцях стикових з'єднань дегазаційного газопроводу

Для моделювання умов транспортування МПС деформованим дегазаційним трубопроводом задавалися такі граничні умови: масова витрата МПС, її густина, об'ємна витрата газу, швидкість руху, термодинамічні параметри.

Використаний для моделювання процесу транспортування МПС деформованим дегазаційним трубопроводом ПК SolidWorks дозволив встановити швидкість руху каптованого газу, його температуру, завихреність частинок механічних домішок та їх число Рейнольдса в нетипових умовах експлуатації ШДС.

В процесі моделювання були прийняті такі умови:

- постійна масова витрата газу Q дорівнює $290 \text{ (м}^3\text{/м)}$;
- температура шахтного середовища T вважається незмінною вздовж траси та дорівнює 20°C ;
- довжина траси $L = 100\text{(м)}$.

Шахтний газопровід моделюється циліндром із внутрішнім радіусом $R = 0.32 \text{ (м)}$, товщиною стінки $\delta = 0.004 \text{ (м)}$ та тиском на вході $p_{z0} = 60 \text{ (КПа)}$.

Для моделювання процесу транспортування каптованого метану приймалися такі параметри:

- газова стала $R_z = 520 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;
- безрозмірний коефіцієнт стисливості $z = 0,9$;
- питома внутрішня теплоємність за постійного обсягу $C_p = 2700 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$.

Згідно з рекомендаціями [14] волога МПС розглядалася як трикомпонентне середовище, що складається з повітря копальні, метану й водяного пару, динамічна в'язкість якого визначалася за виразом:

$$\mu = \frac{\gamma_m M_m + \gamma_v M_v + \gamma_n M_n}{\mu_m + \mu_v + \mu_n}, \quad (25)$$

де y_n, y_v, y_m – об'ємні частки водяного пару, повітря і метану, д.о;

M_n, M_m, M_v – молярні маси МПС, метану і повітря, кг/моль;

μ_n, μ_v, μ_m – динамічні в'язкості водяного пару, повітря і метану, Па·с.

При транспортуванні катованого метану деформованим вакуумним газопроводом спостерігаються процеси підсмоктування рудникового повітря через пошкоджені фланцеві з'єднання і зниження температури МПС. За цих умов зниження температури МПС у дегазаційному трубопроводі визначається як результуюча температура T_r двох потоків газу після їх змішування [15]:

$$T_r = \frac{\frac{Q_1}{k_1-1} + \frac{\Delta Q}{k_v-1}}{\frac{Q_1}{(k_1-1)T_1} + \frac{\Delta Q}{(k_v-1)T_p}}, \quad (26)$$

де Q_1 – витрата МПС з температурою T_1 до змішування з притоками повітря, $\text{м}^3\text{/с}$;

C_1 – концентрація метану в МПС перед її змішуванням, д.о;

k_1, k_v – показники адиабати для повітря і МПС (концентрація метану C_1) відповідно.

На рис. 3 наведено характер перерозподілу температурних потоків МПС, що виникають в вузлових з'єднаннях деформованого шахтного газопроводу. Отримані дані свідчать про ймовірність утворення газогідратів, негативним наслідком яких є зменшення гідравлічного діаметру газопроводу, або повного його закупорювання.

На рис. 4 наведено результати моделювання характеру зміни швидкості складових потоків МПС при проходженні деформованих стикових з'єднань труб, де спостерігається збільшення їх швидкості в місцях механічного скупчення породного та вугільного пилу.

На рис. 5 наведено результати комп'ютерного моделювання поведінки частинок МПС в дегазаційному газопроводі, а саме,

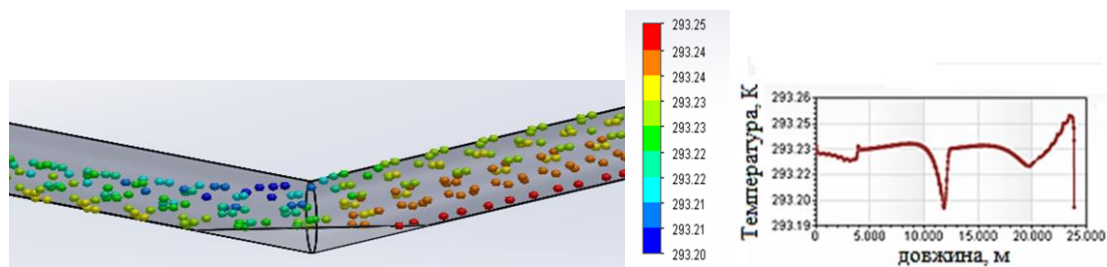


Рисунок 3 – Характер перерозподілу температурних потоків МПС при проходженні деформованих стикових з'єднань труб

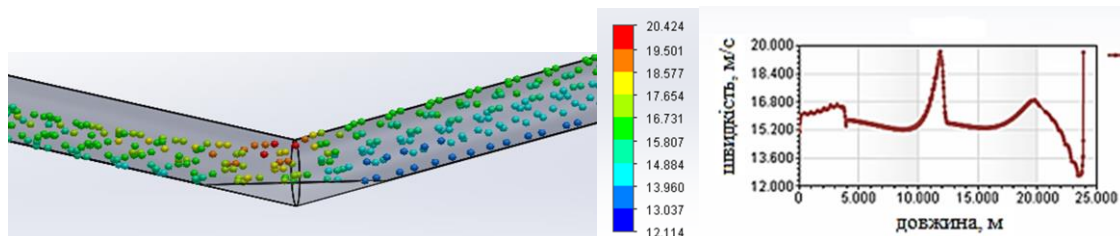


Рисунок 4 – Швидкісні характеристики складових МПС в деформованих ланках шахтних дегазацийних газопроводів

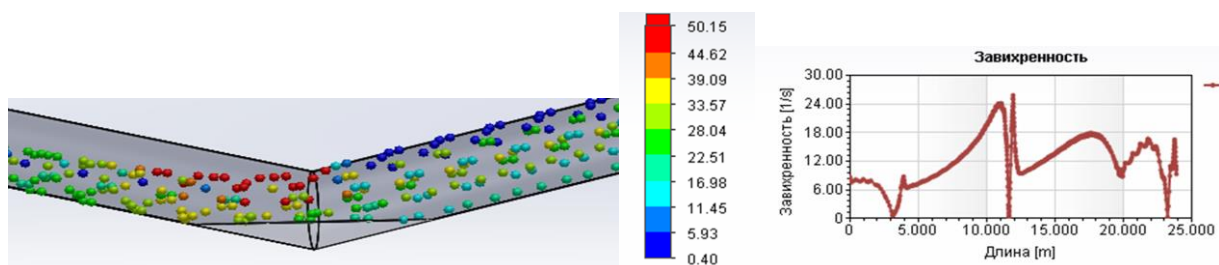


Рисунок 5 – Аналіз завихреності частинок МПС в дегазацийному трубопроводі

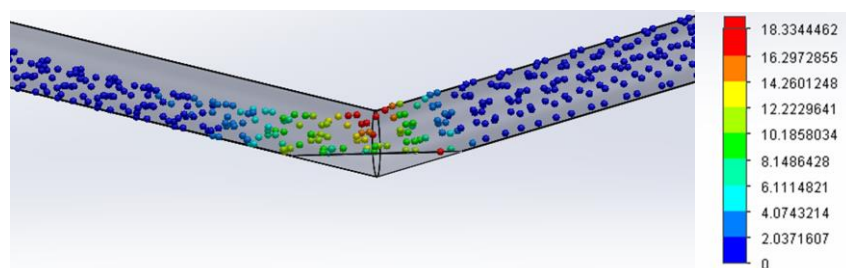


Рисунок 6 – Характер зміни числа Рейнольдса для каптованих частинок МПС у викривленому газопроводі

їх завихреність при проходженні ділянок максимального прогину деформованого трубопроводу. В місцях скупчення механічних відкладень спостерігається турбулентна течія, тобто явище, коли при збільшеній швидкості руху газу утворюються нелінійні фрактальні хвилі, які з'являються випадково, а їх амплітуда змінюється хаотично в деякому інтервалі.

Теоретично та практично доведено, що на подолання гідравлічного опору в трубопроводі припадає 33,9% витрат електроенергії, а максимальне зростання гідравлічних втрат на тертя в газопроводі спостерігається в деформованих стикових з'єднаннях, що здорожчує процес транспортування МПС.

За результатами оцінки отриманих даних було встановлено, що в місцях деформованого стикового з'єднання та відкладень механічних домішок спостерігається збільшення числа Рейнольдса для складових МПС, які транспортуються викривленим шахтним дегазацийним трубопроводом (рис. 6).

Аналіз результатів моделювання умов взаємодії елементів системи «ШГ-ГВ» свідчить, що величини витрат МПС у кінцевому перетині трубопроводу обернено пропорційні зменшенню його прохідного перетину в місці скупчення механічних відкладень породного та вугільного пилу, що призводить до падіння сумарної продуктивності вакуум-насосів. При

цьому падіння їх продуктивності найбільш виражене у випадку зменшення прохідного перетину трубопроводу на 50% і більше.

Отримані показники взаємодії елементів системи «ШГ–ГВ» та результати оцінки технічного стану ШДС дали змогу встановити, що в реальних умовах шахтного середовища проектний профіль траси дегазаційного газопроводу є складною транспортно-технологічною системою, яка під впливом деформацій гірського масиву безперервно змінює свій первісний напрям як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. За результатами математичного та комп'ютерного моделювання було встановлено, що на рух МПС впливають такі негативні фактори, як зміна напрямку та модуля вектору швидкості потоку, шорсткість стінок та механічних відкладень, а також спровоковані місцеві звуження трубопроводу.

Висновки

Ділянки шахтних дегазаційних газопроводів, споруджених у підземних виробках з активними проявами гірського тиску, слід відносити до потенційно небезпечних, оскільки вони провокують утворення зон механічних відкладень часток породного та вугільного пилу, які зменшують гідравлічний діаметр трубопроводу та суттєво впливають на параметри каптованої МПС і ефективність роботи дегазаційних систем.

Суттєве падіння продуктивності вакуумнасосів, що працюють на шахтну дегазаційну мережу, викликане утворенням скупчень рідини у вузлових з'єднаннях деформованого газопроводу, спостерігається при зменшенні прохідних перетинів трубопроводів на 50% і більше.

Для підвищення точності розрахунків технічних характеристик і експлуатаційних параметрів шахтних дегазаційних мереж у діючих галузевих методиках необхідно враховувати вплив негативних явищ гірничого середовища на газодинамічні особливості руху МПС, а саме - припливи рудникового повітря з домішками породного і вугільного пилу через фланцеві з'єднання ланок вакуумного газопроводу та акумуляцію його рідкої фази на ділянках прогину траси.

Література

1. Ширін Л.Н., Єгорченко Р.Р., Сергієнко М.І. Особливості діагностики технічного стану транспортно-технологічної системи «шахтний газопровід – гірничі виробки». *Науково-технічний журнал «ГЕОІНЖЕНЕРІЯ»*. 2021. вип.6. С. 28-37. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241823>
2. Ширін Л.Н., Барташевський С.С., Єгорченко Р.Р. Особливості моніторингу та підтримки технічного стану шахтних дегазаційних газопроводів в умовах інтенсифікації гірничих робіт. *Збірник наукових праць НГУ*. Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка». 2021. № 67. С. 153-164. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.153/>
3. Столбченко Е. В., Пугач С. И. Обоснование параметров участков труб шахтных сетей. Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сборник материалов 15-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Минск–Тула–Донецк. 2019. С. 198-204. <https://rep.bntu.by/handle/data/63094>
4. Новиков Л.А. Математическая модель движения турбулентного потока газовзвеси в дегазационном трубопроводе. *Геотехническая механика*. 2008. Вып. 76. С. 126-131.
5. Лаврик В.Г. Влияние изменяющейся высоты шахтного дегазационного газопровода на величину давления метановоздушной смеси. *Разработка месторождений полезных ископаемых*: 1978. Вып. 49. С. 8 – 10.
6. Скляр Л.А. Расчет давления в наклонных и вертикальных газопроводах. *Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах*: Сб. тр. МакНИИ. 1974. Вып. 10. С. 58-61.
7. СОУ-П 10.1.00174088.018:2009 Система управления 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.
8. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах: затв. Наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62.- Київ: 2010- 2154 (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
9. Правила проектування дегазації вугільних шахт та експлуатації дегазаційних систем: СОУ-П. (2020). Міністерство енергетики України.
10. Малашкина В. А. Исследование факторов, влияющих на качество метановоздушной смеси, подаваемой от скважин на поверхность угольной шахты по газопроводу из композитного материала. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 8. С. 234–242.
11. Цейтлин Ю.А. Анализ течения метановоздушной смеси по негерметичному трубопроводу. *Горная электромеханика и автоматика*. 1977. Вып. 30.

12.Цейтлин Ю.А., Оксень Ю.И. Расчет режима работы дегазационных систем угольных шахт с применением ЭВМ. *Горная электротехника и автоматика*.1976. Вып. 29. С. 52-60.

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

14. Деякі особливості транспортування і переробки метаноповітряної суміші на вугільних шахтах / С.П. Мінєєв, Д.М. Пимоненко, Л.А. Новіков, А.І. Слащов. Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна coll.res.pap.nat.min.univ. 2019, 59:98-107. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.098>

15. Гусарова И.Г., Боярская Ю.В. Классы задач моделирования и численного анализа нестационарных режимов работы газотранспортной системы. *Восточно-Европейский журнал*. 2010. № 3/6(45). С. 26-32.

References

1. Shyrin L.N., Yehorchenko R.R., Serhiienko M.I. Osoblyvosti diahnostryky tekhnichnoho stanu transportno-tekhnolohichnoi systemy «shakhtnyi hazoprovid – hirnycha vyrobka. *Naukovo-tekhnichniy zhurnal «HEOINZhENERIIa»*. 2021. Vol. 6. P. 28-37. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241823>

2. Shyrin L.N., Bartashevskiy S.Ie., Yehorchenko R.R. Osoblyvosti monitoryngu ta pidtrymky tekhnichnoho stanu shakhtnykh de hazatsiinykh hazoprovodiv v umovakh intensyfikatsii hirnychykh robit. Zbirnyk nauko-?ykh prats NHU. Dnipro: Natsionalnyi TU «Dniprovskaya politekhnika». 2021. No 67. P. 153-164 p. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.153/>

3. Stolbchenko E. V., Pugach S. I. Obosnovanie parametrov uchastkov trub shakhtnykh setey. Sotsialno-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki: sbornik materialov 15-oy Mezhdunarodnoy konferentsii po problemam gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki, Minsk–Tula–Donetsk. 2019. P. 198-204. <https://rep.bntu.by/handle/data/63094> [in Russian]

4. Novikov L.A. Matematicheskaya model dvizheniya turbulentsnogo potoka gazovzvesi v degazatsionnom truboprovode. *Geotekhnicheskaya mehanika*. 2008. Vol. 76. P. 126-131. [in Russian]

5. Lavrik V.G. Vliyanie izmenyayusheysya vyisoty shahtnogo degazatsionnogo gazoprovoda na velichinu davleniya metanovozdushnoy smesi. *Razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh*: 1978. Vol. 49. P. 8 – 10. [in Russian]

6. Sklyarov L.A. Raschet davleniya v naklonnykh i vertikalnykh gazoprovodakh . *Borba s gazom, pyilyu i vyibrosami v ugolnykh shahtah: Sb. tr. MakNII*. 1974. Vol. 10. P. 58-61. [in Russian]

7. SOU-P 10.1.00174088.018:2009 Sistema upravleniya proizvodstvom i ohranoy truda v ugolnoy promyshlennosti Ukrainyi (tipovoe rukovodstvo): Utverzhdeno Prikazom Ministerstva ugolnoy promyshlennosti Ukrainyi ot 21.01.2010 g. No 7. Kiev, 2010. 200 p. [in Russian]

8. NPAOP 10.0-1.01-10 Pravyla bezpeky u vuhilnykh shakhtakh: zatv. Nakazom Derzhavnoho komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhrony pratsi ta hirnychoho nahliadu 22.03.2010 No 62. Kyiv: 2010- 2154 (Normatyvnyi dokument Minvuhlepromu Ukrainy). [in Ukrainian]

9. Pravyla proektuvannia de hazatsii vuhilnykh shakht ta ekspluatatsii de hazatsiinykh system: SOU-P. 2020. Ministerstvo enerhetyky Ukrainy. [in Ukrainian]

10. Malashkina V. A. Issledovanie faktorov, vliyayuschih na kachestvo metanovozdushnoy smesi, podavaemoy ot skvazhin na poverhnost ugolnoy shahty po gazoprovodu iz kompozitnogo materiala. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2015. No 8. P. 234–242. [in Russian]

11. Tseytlin Yu.A. Analiz techeniya metanovozdushnoy smesi po negermetichnomu truboprovodu. *Gornaya elektromekhanika i avtomatika*. 1977. Vol. 30. [in Russian]

12.Tseytlin Yu.A., Oksen Yu.I. Raschet rezhima raboty degazatsionnykh sistem ugolnykh shaht s primeneniem EVM. *Gornaya elektromekhanika i avtomatika*.1976. Vol. 29. P. 52-60. [in Russian]

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

14. Deiaki osoblyvosti transportuvannia i pererobky metanopovitrianoi sumishi na vuhilnykh shakhtakh / S.P. Minieiev, D.M. Pymonenko, L.A. Novikov, A.I. Slashchov. Instytut heotekhnichnoi mekhaniky im. M.S. Poliakova NAN Ukrainy, Dnipro, Ukraina coll.res.pap.nat.min.univ. 2019, 59:98-107. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.098>

15. Gusarova I.G., Boyarskaya Yu.V. Klassy zadach modelirovaniya i chislennoho analiza nestatsionarnykh rezhimov raboty gazotransportnoy systemy. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal*. 2010. No 3/6(45). P. 26-32. [in Russian]