

© Л.Н. Ширін¹, Р.Р. Єгорченко¹, В.О. Таран¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МОНІТОРИНГ ТА ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ УТВОРЕННЯ ГАЗОВИХ ГІДРАТІВ У ДЕГАЗАЦІЙНИХ ГАЗОПРОВОДАХ

© L. Shyrin¹, R. Yehorchenko¹, V. Taran¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

MONITORING AND OPERATIONAL CONTROL OF THE GAS HYDRATES FORMATION IN GAS DEGASSING PIPELINES

Мета. Створення методики оперативного визначення зон механічних і рідинних відкладень в деформованих ділянках шахтних дегазацийних газопроводах для попередження процесу гідратуутворення та підвищення їх пропускної здатності.

Методика дослідження. Розглянуто особливості моніторингу технічного стану шахтних дегазацийних систем (ШДС), а також методичний супровід для оперативного контролю зон їх утворення в реальних умовах шахтного середовища. Визначено підходи до оцінки, контролю та методів прогнозування зон утворення газових гідратів під впливом специфічних факторів шахтного середовища та розроблено інноваційні технічні рішення для підвищення пропускної здатності дегазацийної системи.

Результати дослідження. За результатами оцінки сучасних тенденцій у галузі моніторингу та прогнозування зон утворення газових гідратів встановлено, що в зарубіжній практиці впроваджується принципово новий підхід до забезпечення безаварійної експлуатації трубопровідного транспорту. Розроблено методику моделювання процесу гідратуутворення в деформованих дегазацийних газопроводах в умовах невизначеності та запропоновані технічні рішення для підвищення експлуатаційних показників ШДС.

Наукова новизна. Обґрунтовані інноваційні технічні рішення щодо модернізації діючих дегазацийних систем для підвищення пропускної спроможності шахтних трубопроводів та прогнозування зон утворення кристалічних газових гідратів в процесі транспортування метаноповітряної суміші (МПС) від свердловин до вакуум-насосних станцій.

Практичне значення. Розроблено програму і методику проведення моніторингу та діагностики шахтних дегазацийних газопроводів з використанням інноваційних технічних рішень для оперативного визначення місць утворення газових гідратів та підвищення пропускної спроможності при поточній експлуатації.

Ключові слова: дегазация, підземний вакуумний газопровід, метаноповітряна суміш, моніторинг, газогідрати, пропускна спроможність.

Актуальність. Для підвищення енергоефективного освоєння ресурсної бази діючих вугледобувних підприємств України проводиться попутний видобуток шахтного метану.

З розвитком методів та технологій видобування, транспортування, зберігання та переробки газу з'явилась проблема утворення газових гідратів в дегазацийних газопроводах. Надійна робота дегазацийного газопроводу і компресорних

станцій безпосередньо залежить від якості газу, що транспортується від свердловини до вакуум насосних станцій (ВНС).

Експериментально встановлено [1], що на експлуатаційну надійність та технічні показники шахтних газотранспортних систем впливають якісні показники природного газу, особливо за такими параметрами як його вологість та вміст твердих механічних домішок. Обумовлено це тим, що при транспортуванні вологої метаноповітряної суміші (МПС) в місцях деформацій ланок газопроводу відбувається відкладення води, механічних домішок та утворення газових гідратів, які провокують збільшення гідравлічного опору системи та зниження пропускної спроможності трубопроводів.

Відомо, що для утворення газових гідратів необхідне одночасне виконання трьох умов: наявність вологи в газі, низька температура та високий тиск газу. За певних умов експлуатації ШДС волога, яка знаходиться в метаноповітряній суміші, може з газоподібного стану переходити до стану утворення кристалогідратів та формування в газопроводах гідратних пробок. Витрати на усунення гідратних пробок досягають 30% собівартості транспортованого газу, тому розробка спеціальних заходів щодо запобігання і своєчасного виявлення процесу гідратування та уникнення аварійних ситуацій є актуальним питанням.

Слід зазначити, що в існуючих програмах та методиках визначення процесів формування газових гідратів в трубопроводі описуються умови їх утворення та не розглядається технічний стан дегазаційних газопроводів та умови шахтного середовища, які сприяють цьому процесу.

Через невирішену проблему попередження гідратування при низькотемпературній обробці газу фактична температура процесів нерідко перевищує проектну, внаслідок чого з газу недостатньо повно відокремлюється рідина. Наявність у газі вологи, рідких вуглеводнів, агресивних і механічних домішок знижує пропускну здатність газопроводів, збільшує витрату інгібіторів, посилює корозію. Все це знижує надійність роботи газозбірної системи, збільшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій. Аналіз нормативної документації [1, 2] щодо організації попередження та моніторингу гідратування в шахтних дегазаційних трубопроводах показав, що на даний момент у гірничій галузі відсутні технічні, методичні та нормативно-правові документи щодо вирішення означеної проблеми.

В нафтогазовій промисловості відмічають, що найбільш нестабільні технологічні режими течії газу в трубопроводах виникають в період пусків і зупинок газоперекачувальних агрегатів. В роботі [2] відмічається, що при експлуатації магістральних трубопроводів у пусковий період часто спостерігається утворення гідратних пробок, поява яких зазвичай пов'язують з недостатнім видаленням води з газу. Крім того, одна з головних причин даного явища полягає в тому, що на внутрішній поверхні стінки труб утворюються конденсат води, який сприяє утворенню гідратів, тобто, конденсат вологи переходить в гідратну фазу.

В роботах [3, 4] розглядається механізм транспортування вологого газу по магістральному газопроводу, який супроводжується процесом відкладення газогідрату (облітерацією) на його внутрішній поверхні. Цей процес відбувається двома способами:

- в режимі теплового балансу;
- в режимі дефіциту води.

Слід відзначити, що на початковому етапі, коли настає умова утворення кристалогідратів, процес відкладення йде в режимі теплового балансу. В процесі гідратоутворення відбувається збіднення потоку вологою тому облітерація стінок газопроводу формується в режимі дефіциту води.

Описані явища облітерації стінок в магістральних газопроводах спостерігаються при транспортуванні метаноповітряних сумішей (МПС) по розгалуженим шахтним дегазаційним мережам. В роботі [5] відзначається, що в місцях порушення герметичності стикових з'єднань деформованого шахтного газопроводу здійснюються підсмоктування рудникового повітря та відкладення вугільного і породного пилу (рис. 1), які змінюють режими транспортування МПС і, при відповідних умовах експлуатації, провокують утворення кристалогідратів.

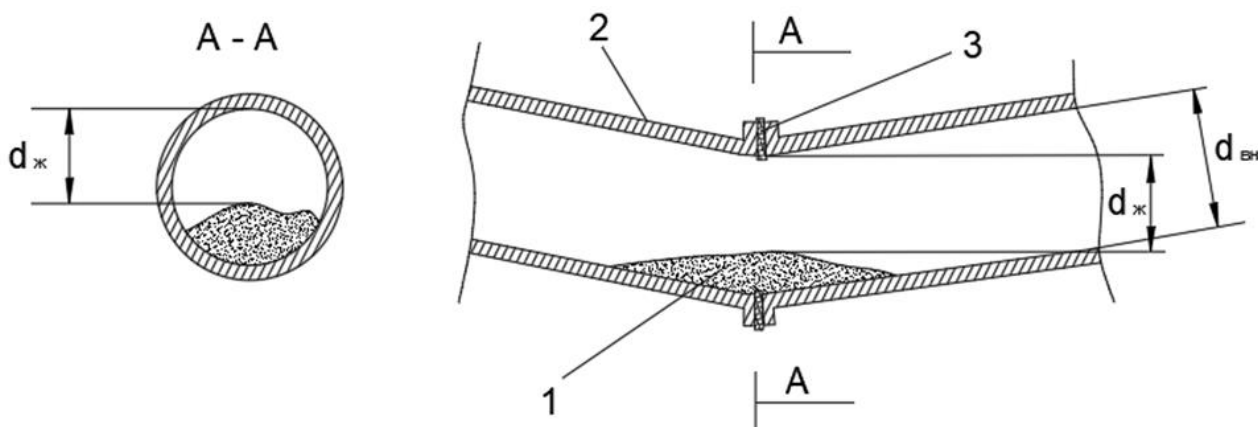


Рис. 1. Схема деформованого шахтного газопроводу та типових зон відкладення кристалогідратів: $d_{вн}$ – внутрішній діаметр газопроводу (мм); $d_{ж}$ – діаметр живого перерізу (мм); 1 – відкладення кристалогідратів; 2 – дегазаційний газопровід; 3 – ущільнювач з параніту

Слід відзначити, що в специфічних умовах експлуатації ШДС найважливішим завданням технології транспортування метаноповітряної суміші в підземних виробках складної конфігурації є визначення місць можливого утворення газових гідратів в газопроводі.

В складних умовах шахтного середовища оперативно розпізнавати місця можливого утворення кристалогідратів в дегазаційних газопроводах не представляється можливим. Обумовлено це відсутністю в галузі нетрадиційних для шахтних умов досліджень і спеціальної вимірювальної апаратури. Для рішення

означених проблем механізм утворення кристалогідратів в шахтних дегазаційних газопроводах розглядається шляхом моделювання процесу транспортування МПС по деформованому шахтному газопроводу.

Програмою досліджень передбачено, що визначення умов транспортування каптованої МПС, складу газу, вологості та технічного стану дегазаційного газопроводу дозволить прогнозувати зони та специфіку утворення газових гідратів в ШДС. Постійний моніторинг зміни тиску і температури по довжині газопроводу дає змогу прогнозувати зони та швидкість накопичення механічних відкладень і кристалогідратів, що дозволяє вчасно вжити профілактичні заходи.

Постановка задачі і методи дослідження. Керуючись міжнародними стандартами та сучасними вимогами щодо технічного моніторингу дегазаційних газопроводів [6, 7], метою дослідження є вдосконалення методів обслуговування та підтримки технічного стану шахтного дегазаційного трубопроводу для попередження та оперативного контролю утворення гідратів в умовах шахтного середовища.

У відповідність до структурно-логічної схеми дослідження для реальних умов шахтного середовища розглянуто існуючі методи та підходи щодо попередження процесу утворення кристалогідратів.

Експериментально доведено [5], що діючі у суміжних галузях способи оперативного контролю утворення гідратів дозволяють встановлювати зони утворення гідравлічних пробок в магістральних газопроводах, прокладених на поверхні та своєчасно виконувати профілактичні роботи по їх усуненню.

Результати досліджень галузевих та міжнародних методик моніторингу технічного стану магістральних газопроводів послужили базою для формування системи заходів щодо оцінки режимів роботи дегазаційних газотранспортних систем в типових, нетипових та екстремальних умовах експлуатації.

Мета. Створення методики оперативного визначення зон механічних і рідинних відкладень в деформованих ділянках шахтних дегазаційних газопроводів для попередження процесу гідратоутворення та підвищення їх пропускної здатності.

Завдання досліджень:

- розробка методики прогнозування зон утворення газових гідратів у сталевих дегазаційних трубопроводах;
- встановлення особливостей утворення газових гідратів при експлуатації шахтних дегазаційних газопроводів;
- розробка інноваційних технічних рішень щодо удосконалення системи оперативного контролю процесу утворення кристалогідратів.

Основний матеріал. Одним з ключових чинників, що негативно впливають на експлуатаційну надійність шахтних дегазаційних газопроводів, споруджених в підземних гірничих виробках, є утворення газових гідратів. Процес гідратоутворення супроводжується появою перепаду тиску і температури відповідно перед і після зони утворення гідратів.

Експериментально встановлено [8], що каптований метан транспортують від дегазаційних свердловин по мережі шахтних газопроводів, які під впливом

деформацій порід підземних виробок змінюють своє просторове положення та створюють сприятливі умови для механічних відкладень породного і вугільного пилу та утворення гідратів. Запобігання та своєчасне виявлення процесу гідратування та уникнення аварійних ситуацій при експлуатації шахтних газопроводів є актуальним питанням сьогодення.

Каптований метан вугільних родовищ містить механічні тверді та рідкі домішки - пісок, пил, масло, конденсат та агресивні води, мінеральних масла та солі.

Основними показниками оцінки якості МПС, що транспортується шахтними газопроводами є:

- вміст вологи в газі, яка сприяє процесу корозії сталевих газопроводів та обладнання компресорних станцій, а також утворенню кристалогідратів;
- вміст механічних домішок, які викликають ерозію та знос газопроводів і призводять до засмічення контрольно-вимірювальних приладів, що традиційно використовуються в шахтних умовах.

Склад та фізико-хімічні характеристики багатокомпонентної МПС, що транспортується по дегазаційним газопроводам, залежить від властивостей шахтного середовища, яке постійно змінюється у просторі і часі.

Досвід експлуатації ШДС показує, що починаючи з буріння дегазаційних свердловин, а також в процесі підготовки та транспортування МПС по дегазаційним газопроводам при певних умовах утворюються досить стабільні тверді хімічні сполуки – газові кристалогідрати.

Вірогідність існування кристалогідратів і з'єднань компонентів каптованого метану з водою в свердловинах та газопроводах призводить до негативних технічних і технологічних наслідків і навіть до виходу з ладу обладнання ШДС.

Умови утворення та відкладення гідратів у газопроводах та свердловинах докладно описані у роботах [9, 10]. Процеси руху газу у трубопроводах автори розглядають у межах трубої гидравліки, а динаміку гідратування за допомогою математичної моделі, у якій фазовий перехід газу в стан кристалогідратів пов'язано зі зміною тиску. Зміна в часі товщини шару кристалогідратів описується системою рівнянь при постійному перерізі трубопроводу і тиску в ньому.

Особливістю математичної моделі гідратування в ШДС є те, що процес формування газових кристалогідратів розглядаються як рух вологонасиченої метаноповітряної суміші в дегазаційному вакуумному трубопроводі з внутрішнім радіусом r_0 і зовнішнім – R . Необхідно відзначити, що при транспортуванні вологонасиченої метаноповітряної суміші по шахтному газопроводу кількість вологи, необхідної для утворення гідрату, зберігається по всій довжині газопроводу. В процесі деформації гірського масиву змінюється профіль траси газопроводу та порушується герметичність стикових з'єднань труб в яких відкладаються механічні домішки породного і вугільного пилу та волога. В подібних ситуаціях прохідний переріз S і діаметр $D = 2(r_0 - \zeta(z, t))$ дегазаційного газопроводу змінюються в просторі та часі, що провокує утворення газових кристалогідратів. Де $\zeta(z, t)$ – товщина шару гідрату в трубі.

В роботі [9] відмічається, що процес гідратуутворення йде повільно, а тиск і температура газу описуються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dz} = -\rho g - \frac{\psi \sqrt{\pi} M^2}{4S^{\frac{5}{2}} \rho}, \\ \frac{dT}{dz} = -\frac{gS}{c_p} + \frac{\alpha_w (T_w - T) \pi D}{M_{cp}} + \varepsilon \frac{dp}{dz}. \end{cases} \quad (1)$$

де z – координата вздовж осі труби, g – прискорення вільного падіння, ρ – щільність газу, $M = \rho v S$ – постійна масова витрата газу (v – швидкість потоку), C_p – питома теплоємність газу при постійному тиску, ψ – коефіцієнт гідравлічного опору, ε – коефіцієнт Джоуля-Томсона.

Для системи (1) задаються початкові умови:

$$\begin{cases} p(0) = p_1, \\ T(0) = T_1. \end{cases} \quad (2)$$

Система (1) доповнюється рівнянням стану:

$$\rho = \frac{p}{Z_0 RT}, \quad (3)$$

де коефіцієнт стисливості газу Z_0 задається рівнянням Латонова-Гуревича:

$$Z_0(p, T) = \left[0,173761 \ln\left(\frac{T}{T_c}\right) + 0,73 \right]^{\frac{p}{p_c}} + 0,1 \frac{p}{p_c} \quad (4)$$

В роботі [10] відмічається, що температура стінки T_w для зон вкритих газовими гідратами, приймається $T_w = T_f$. Температура T_f фазового переходу газ – гідрат визначається рівнянням:

$$T_f(p) = \beta_1 \ln\left(\frac{p}{10^5}\right) + \beta_2, \quad (5)$$

де β_1 і β_2 — емпіричні постійні.

Експериментально доведено [11], що причинами зниження ефективності газопроводу є наявність в порожнині свердловини малов'язких рідких скупчень – води і газового конденсату. Причиною їх появи є некондиційність підготовки газу до транспортування (тобто висока температура точки роси).

Попередніми дослідженнями [12] встановлено, що в результаті деформацій гірського масиву відбуваються просторові зміни траси шахтного газопроводу та його геометричної форми, що призводить до деформації паранітових ущільнювачів та видавлювання їх в середину газопроводу (рис. 2).

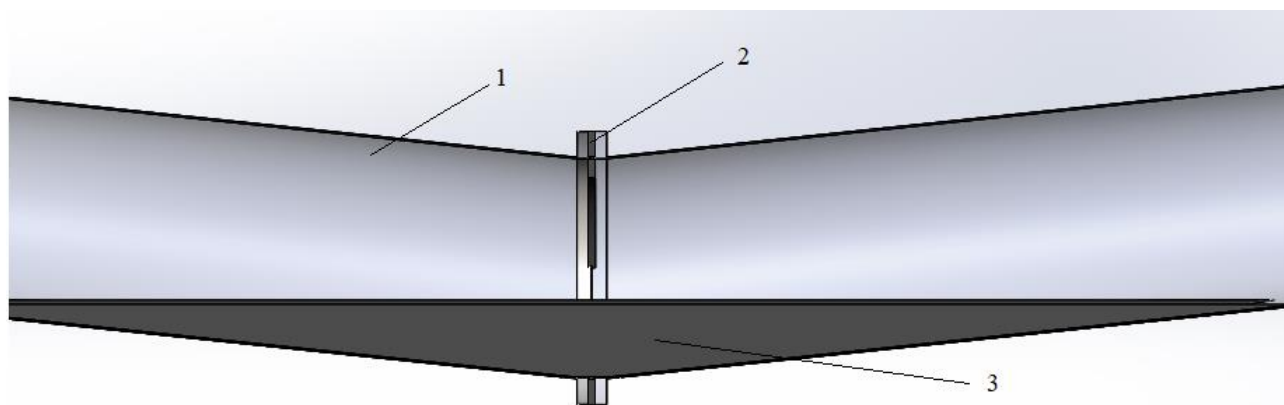


Рис. 2. Поздовжній переріз деформованого газопроводу: 1 – газопровід; 2 – ущільнювач з параніту; 3 – зона відкладення механічних домішок та кристалогідратів

Необхідно відзначити, що умови транспортування МПС по деформованому дегазаційному газопроводу є малодослідженою проблемою гірничого виробництва і вимагають виконання спеціальних досліджень щодо встановлення механізму утворення кристалогідратів та їх впливу на корозійну стійкість сталевих труб. У зв'язку з цим, подальший розгляд нетрадиційної для галузі технічної задачі виконується шляхом моделювання процесу транспортування газової суміші по деформованому газопроводу з використанням програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation.

В процесі моделювання деформована ділянка газопроводу та гірничка виробка в програмі SolidWorks Flow Simulation розглядаються комплексно. Використовуючи метод об'ємних елементів (МСЕ) [13], програма дозволила виконати структурний аналіз траєкторії транспортування МПС по викривленому газопроводу та прогнозувати зони утворення газогідратів.

Моделювана ділянка, викривленої в профілі траси дегазаційного трубопроводу, складається з 8 ланок труб довжиною 4,0 м, діаметром 350 мм і товщиною стінки 4,0 мм. Труби для дегазації, що поставляються шахтам, виготовлені з простої вуглецевої сталі без спеціального покриття.

Для моделювання умов транспортування МПС по деформованому дегазаційному трубопроводу задавалися наступні граничні умови: масова витрата МПС, її густина, об'ємна витрата газу, швидкість руху, термодинамічні параметри.

Для моделювання процесу транспортування каптованого метану приймалися наступні параметри:

- газова постійна $R_g = 520$ Дж/(кг·К);
- безрозмірний коефіцієнт стисливості $z = 0,9$;
- питома внутрішня теплоємність при постійному обсязі $C_p = 2700$ Дж/(кг·град).

На рис. 3 приведені результати комп'ютерного моделювання якісних і кількісних показників руху МПС по деформованому газопроводу.

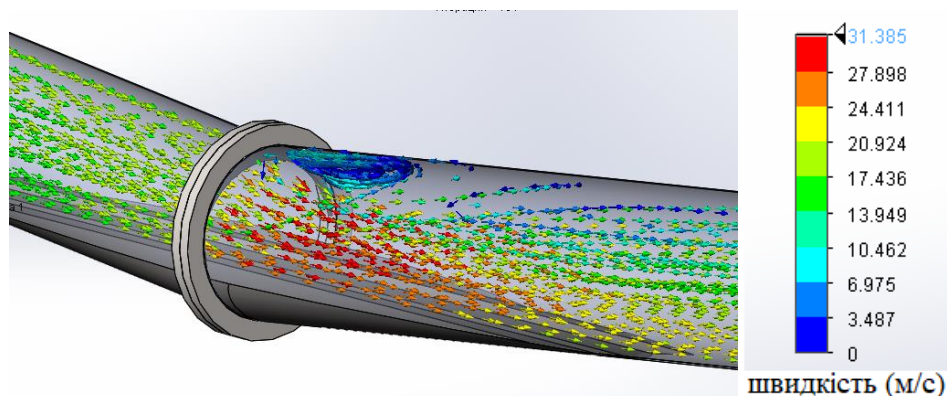


Рис. 3. Характерні зміни швидкісних характеристик МПС в зонах відкладення механічних домішок та формування газових гідратів

Наведені показники характеризують зміни швидкості транспортованої МПС, збільшення гідравлічного опору та зниження пропускної здатності дегазаційного газопроводу в зонах деформованих стикових з'єднань сталевих труб.

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 робить процес транспортування МПС дорожчим.

На рис. 4 наведено результати зміни тиску в деформованій частині газопроводу. Встановлено, що при проходженні деформованих стикових з'єднань відзначаються різкі знакозмінні коливання тиску МПС з поступовим його вирівнюванням в лінійних частинах труб.

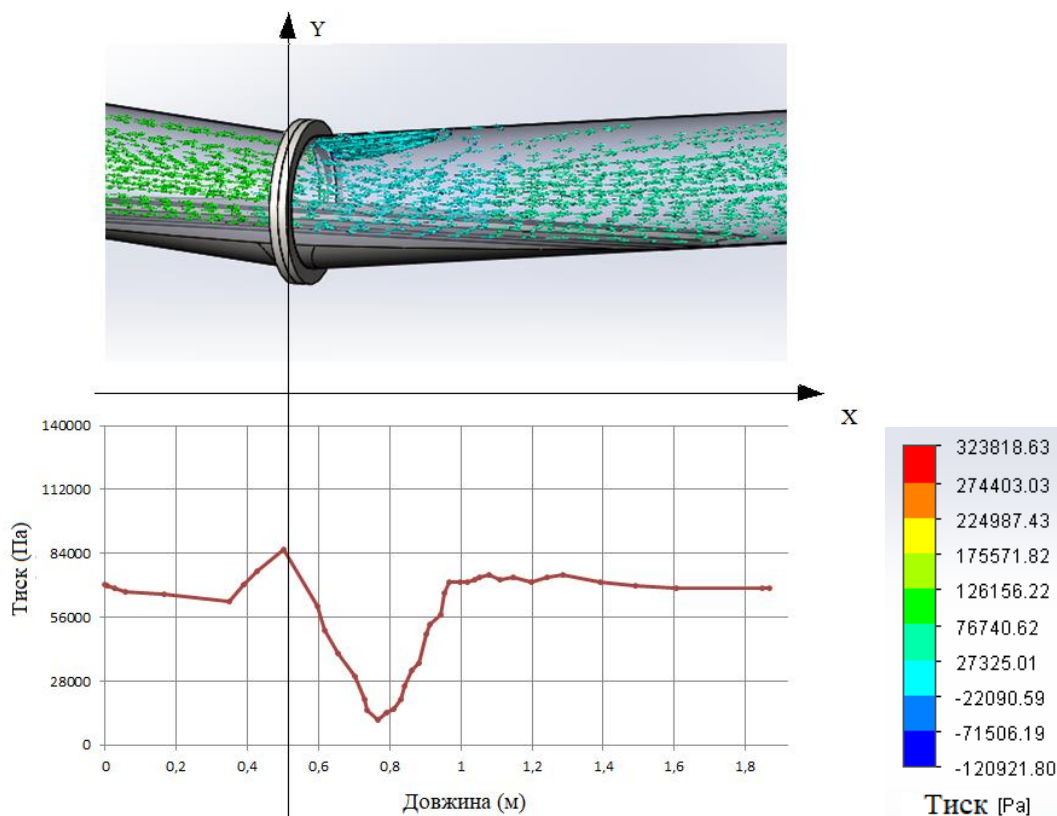


Рис. 4. Характер перерозподілу тиску в деформованих стикових з'єднаннях труб

Потенційно небезпечні ділянки деформованих дегазаційних газопроводів слід відносити до нетипових, оскільки в них відбуваються осідання часток породного і вугільного пилу та утворення газових кристалогідратів, що в цілому зменшує гідравлічний діаметр трубопроводу та суттєво впливає на параметри каптрованої МПС і ефективність роботи вакуум-насосів.

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

Слід відзначити, що в розгалуженій мережі шахтних дегазаційних газопроводів неможливо уникнути процесу гідратоутворення, тому оперативне його попередження є обов'язковою складовою при експлуатації і моніторингу ШДС.

Аналіз виконаних досліджень свідчить про те, що для попередження утворення газових гідратів необхідно своєчасно проводити моніторинг технічного стану дегазаційних газопроводів.

За результатами аналізу вітчизняного і зарубіжного досвіду забезпечення безаварійної роботи газозбірних систем в нафтогазовій та гірничій галузях [14, 15] була виконана експертна оцінка сучасних засобів діагностики і контролю режимів роботи газопроводів. Для попередження аварійних ситуацій, що виникають при відкладенні кристалогідратів у зв'язку з повним гідруванням шлейфа та гирла свердловини рекомендовано впровадити програмно-технічний комплекс контролю параметрів газозбірної системи з використанням датчиків температури і тиску фірми Fisher 3051 [16], які дозволять:

- в режимі реального часу визначати тиск та температуру газу безпосередньо на фонтанній арматурі свердловин з диспетчерської;
- виконувати оперативний контроль за параметрами роботи окремо по кожній свердловині;
- визначати місце та початок гідруванням в газозбірній системі;
- підвищити точність і достовірність показів датчиків;
- оперативно приймати рішення про подальші дії при виникненні аварійної ситуації.

На рис. 5 наведена принципова схема роботи модулів контролю температури та їх встановлення на дегазаційному газопроводі.

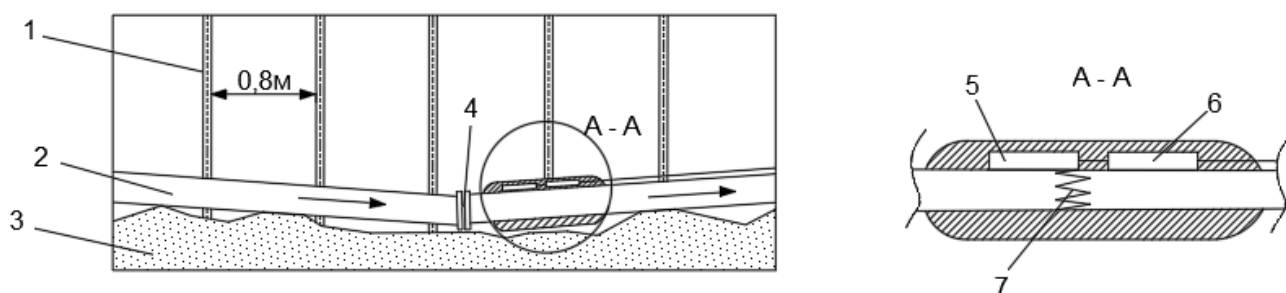


Рис. 5. Схема роботи модулів контролю температури: 1 – стійка рамного кріплення; 2 – газопровід; 3 – підшва гірничої виробки 4 – стикове з'єднання труб; 5 – перетворювач сигналу; 6 – модуль радіоканалу; 7 – електрод

Принцип роботи датчика температури полягає в тому, що при зміні температури навколишнього середовища змінюється опір електрода 7 (від 50 до 100 Ом) перетворювач сигналу 5 перетворює його значення в електричний сигнал у діапазоні 4 – 20 мА. Електричний сигнал подається на модуль радіоканалу 6. Модуль радіоканалу перекодує отримані значення в звичайний цифровий сигнал і передає дані в диспетчерську.

Покази цих датчиків необхідно вивести на монітор комп'ютера в диспетчерській службі. Оскільки модулі працюють на низькому рівні напруги, то живлення цих датчиків забезпечується звичайними елементами АА (лужні або NiCd), що допустимо для шахтних умов експлуатації.

Перевагою даної системи є відносно невелика вартість датчиків, мінімальний час встановлення датчиків у зв'язку з відсутністю кабельних ліній та відсутність проведення вогневих і газонебезпечних робіт при встановленні датчиків.

Висновки. Ділянки шахтних дегазаційних газопроводів, споруджених в підземних виробках з активними проявами гірського тиску, слід відносити до потенційно небезпечних, оскільки вони провокують утворення зон газогідратів, 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 вакуум-насосів, що працюють на шахтну дегазаційну мережу, викликане утворенням скупчень рідини у вузлових з'єднаннях деформованого газопроводу, спостерігається при зменшенні прохідних перерізів трубопроводів на 50% і більше.

Постійний моніторинг і контроль за температурою та тиском газу в деформованих частинах газопроводу забезпечує вчасне й оперативне реагування на будь-які зміни цих параметрів, що призводить до безаварійної роботи ШДС та зменшує трудовитрати обслуговуючого персоналу.

Швидке та систематизоване надходження інформації про параметри роботи шахтної дегазаційної системи до диспетчерської служби дозволить отримувати повну і достовірну інформацію щодо режимних параметрів дегазаційної системи і занесення їх в електронні журнали в автоматизованому режимі.

Перелік посилань

1. Розгонюк, В.В., Руднік, А.А., & Коломєєв, В.М. (2001). *Довідник працівника газотранспортного підприємства*. Ростов.
2. СТП 320.30019801.018-2000. Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів.
3. Макогон, Ю.Ф. (1985). *Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование*. Недра.
4. Прахова, М. Ю., Краснов, А. Н., & Хорошавина, Е.А. (2017). Аналіз методів діагностування гідратоутворення у шлейфах. *Електронний журнал №1 "Нафтогазова справа"*. 77-94.
5. Ширін, Л.Н., & Литвин, А.Д. (2016). Попередження та оперативний контроль утворення гідратів у дегазаційних трубопроводах. *Газогідратні технології у гірництві, нафтогазовій справі, геотехніці та енергетиці*. 255- 259.
6. Мазур, М.П., & Побережний, Л.Я. (2014). Моделювання процесів гідратоутворення під час транспортування газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 4, 26-32.

7. Химко, М.П., Дацюк, А.В., Фролов, В.А., & Пономарьов, Ю.В. (2007). *Довідник інженера диспетчерської служби*. ВАТ УЦЕБОПнафтогаз.
8. Ширін, Л.Н., Єгорченко, Р.Р., & Сергієнко, М.І. (2021). Особливості діагностики технічного стану транспортно – технологічної системи «шахтний газопровід – гірнична виробка». *Науково-технічний журнал «ГЕОІНЖЕНЕРІЯ»*, 6, 28-37.
<https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241823>
9. Бондарев, Э.А., Габышева, Л.Н., & Каниболотский, М.А. (1982). Моделирование образования гидратов при движении газа в трубах. *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*, 5, 105-112.
10. Аргунова, К.К., Бондарев, Э.А., & Рожин, И.И. (2011). Математические модели образования гидратов в газовых скважинах. *Криосфера Земли*, 15(1), 65-69.
11. Хайруллин, М. Х., Шамсиев, М. Н., Морозов, П. Е., & Тулупов, Л. А. (2008). Моделирование гидратообразования в стволе вертикальной газовой скважины. *Вычислительные технологии*, 13(5), 88-94.
12. Ширін, Л.Н., Барташевський, С.Є., & Єгорченко, Р.Р. (2021). Особливості моніторингу та підтримки технічного стану шахтних дегазаційних газопроводів в умовах інтенсифікації гірничих робіт. *Збірник наукових праць НГУ*, 67, 153-164
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.153>
13. Bethune, J.D.. (2009). *Engineering Design and Graphics with Solid Works*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
14. Побережний, Л.Я., & Мазур, М.П. (2013). Особливості корозії промислових трубопроводів під дією газогідратів. *Вісник ЧНУ*, 13 (202), 167-177.
15. Новиков, Л.А. (2008). Математическая модель движения турбулентного потока газозвеси в дегазационном трубопроводе. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр.*, 76, 126-131.
16. *Product Data Sheet: Rosemount™ 3051. Pressure Transmitter*. (2017). 00813-0100-4001, Rev TA. https://www.instrumart.com/assets/rosemount_3051_datasheet.pdf

ABSTRACT

Purpose. Creation of operational determination methodology of mechanical and liquid deposit zones in deformed sections of mine degassing gas pipelines to prevent the process of hydrate formation and increase their throughput.

Research methodology. The peculiarities of monitoring the technical condition of mine degassing systems (MDS), as well as a methodical support for operational control of their formation zones in the mine environment real conditions, are considered. Approaches to assessment, control and forecasting methods of gas hydrate formation zones under the influence of mine environment specific factors were determined and innovative technical solutions were developed to increase the degassing system throughput.

Findings. Based on the results of modern trends assessment in the field of monitoring and forecasting gas hydrate formation zones, it was established that a fundamentally new approach to ensuring the accident-free operation of pipeline transport is being implemented in foreign practice.

Originality. Grounded innovative technical solutions for existing degassing systems modernization to increase the throughput capacity of mine pipelines and predict the formation zones of crystalline gas hydrates during transporting methane-air mixture from wells to vacuum pumping stations.

Practical implications. A program and methodology for monitoring and diagnosing mine degassing gas pipelines have been developed using innovative technical solutions to promptly determine the gas hydrate formation places and increase throughput during the current operation.

Keywords: degassing, underground vacuum gas pipeline, methane-air mixture, monitoring, gas hydrates, throughput.