

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ В ЗОНАХ ШАХТНИХ ВИРОБІТОК

І.В. Ориняк, А.В. Богдан, З.С. Ясковець

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

The paper deals with the calculation of the stress-strained state of buried pipelines in the areas of coal mining. An effective numerical iterative procedure is developed for the modeling of the stress state which takes into account the elastic-plastic model of the interaction of the pipe surface and the soil. In order to diagnose the stress-strained state of pipelines during the production of mining, a system of their continuous monitoring was created. The correctness of the numerical simulation of the stressed state of the gas pipeline as well as effectiveness of the activities which are developed to reduce the high stress level in dangerous zones is confirmed by the relevant monitoring data of the stressed state.

Вступ. В системі магістральних газопроводів (МГ) України є одинадцять територій, які підроблюються вугледобувними шахтами [1]. Вплив зрушень земної поверхні від виробітки шахтних лав для таких ділянок висуває додаткові вимоги як до аналізу напруженого стану МГ, так і до формування заходів по забезпеченню надійної експлуатації МГ. Зважаючи на це та випадки руйнувань МГ, які відбувались на підроблюваних територіях, актуальною є розробка методів розрахунку напруженого стану МГ в зоні шахтних виробіток та створення системи неперервного моніторингу за напруженнями, які виникають в газопроводі під час проходження шахтної лави.

В даній роботі представлено комплексний підхід до оцінки технічного стану ділянки МГ, що полягає в розрахунковому прогнозуванні та апаратному моніторингу напруженого стану. Для моделювання напруженого стану підземних газопроводів-відводів в зоні виробітки шахтних лав використовується чисельна ітераційна процедура для аналізу напружено-деформованого стану плоского трубопроводу в середовищі [2]. Для моніторингу напружено-деформованого стану ділянок МГ під час проходження шахтних лав розроблена система діагностики на основі тензометрії. Результати моніторингу використовувались як для підтвердження коректності виконаного моделювання напруженого стану, так і для вивчення процесів росту та релаксації напружень під час проходження шахтних лав.

Моделювання напружено-деформованого стану. При оцінці міцності трубопроводу, що знаходиться в зоні впливу шахтних виробіток, для розрахунку напружень необхідно враховувати не тільки експлуатаційні навантаження (внутрішній тиск, температурний перепад), але і додаткові згинальні моменти, викликані поперечними зміщеннями ґрунту (у вертикальній і горизонтальній площинах) і додаткові осьові зусилля від поздовжніх зсувів ґрунту.

Аналіз впливу поперечних переміщень ґрунту на напружений стан труби показав, що вони призводять до виникнення згинальних моментів і збільшення довжини трубопроводу за рахунок його викривлення. На рис. 1 схематично представлена зміна осі труби (штрихова лінія) при осіданні ґрунту від однієї лави.

Додаткові напруження σ , що викликані зміною довжини визначаються як:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

де E – модуль Юнга; ε – деформація. При нелінійній оцінці маємо:

$$\varepsilon = \frac{S-l}{l} \approx \frac{\pi/2 - \beta}{\cos\beta} - 1, \quad (2)$$

де l – початкова довжини труби, S – нова довжина труби.

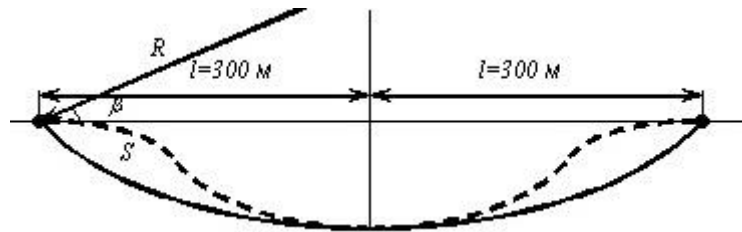


Рис. 1. Оцінка величини видовження труби.

Напруження розраховані з урахуванням нелінійної оцінки деформації (2) показали, що навіть при глибині осідання 4м (що відповідає виробленню 5 пластів) додаткові напруження не перевищують 25МПа. Таким чином, при виробленні декількох лав результуючі напруження від зазначених факторів незначні і можуть не враховуватися в подальшому аналізі. Тому розрахунок напруженого стану для підземних ділянок трубопроводів, що проходять в зонах шахтних виробіток, як правило, ведеться тільки для поздовжніх зсувів ґрунту [3, 4]. Отже при моделюванні напружено-деформованого стану трубопроводу в зоні шахтних виробіток з п'яти типових випадків взаємодії трубопроводу з ґрунтом [5] враховується тільки опір ґрунту поздовжнім переміщенням труби.

В загальному випадку поведінка трубопроводу в середовищі описується системою з 6 диференціальних рівнянь, які враховують як поздовжню, так і поперечну взаємодію трубопроводу з середовищем (ґрунт) [2]. Для врахування сили взаємодії між трубопроводом та ґрунтом використовується ідеалізований пружнопластичний характер функцій q_t (сила взаємодії в осьовому напрямку) і q_n (сила взаємодії в поперечному напрямку), що є функціями від взаємного переміщення трубопроводу та ґрунту [2]. Узагальнений графік залежності реакції ґрунту від взаємного зсуву трубопроводу і ґрунту показаний на рис. 2. Характерними точками цього графіка є: q^0 , w^0 , які знаходяться за стандартизованими характеристиками ґрунту [3, 4].

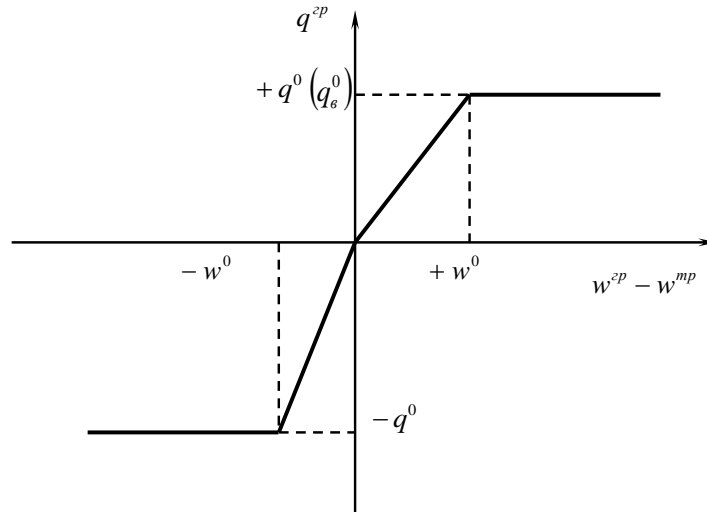


Рис.2. Узагальнена діаграма взаємодії трубопроводу з ґрунтом.

Оскільки, як вже вказувалось вище, при розрахунку напруженого стану трубопроводу, що знаходиться в зоні шахтних виробіток, основними є напруження від поздовжніх зсувів ґрунту, то загальна система рівнянь для елементарної ділянки трубопроводу dx значно спрощується до вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{dN(x)}{dx} &= q_t(x); \\ \frac{du}{dx} &= -\frac{N(x)}{EF}, \end{aligned} \tag{3}$$

Система (3) доповнюється граничними умовами на кінцях розрахункової ділянки [2]:

$$N_b = u_b \beta EF; N_e = -u_e \beta EF. \quad (4)$$

де β визначається з співвідношення:

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi DC_x}{EF}}, \quad (5)$$

D – зовнішній діаметр трубопроводу; F – площа поперечного перерізу трубопроводу; C_x – узагальнений коефіцієнт дотичного опору ґрунту.

Чисельна ітераційна процедура розв'язку полягає в використанні системи (3) для кожної елементарної ділянки трубопроводу в залежності від пружної або пластичної взаємодії трубопроводу та ґрунту. Пошук загального розв'язку виконується на основі понять базового і корегуючого розв'язків. Базовий розв'язок складається з зафіксованих на даній ітерації переміщень, на основі яких визначається характер взаємодії (пружний або пластичний) трубопроводу та ґрунту на наступній ітерації. Корегуючий розв'язок є розв'язком систем рівнянь (3) з урахуванням сил взаємодії труби та ґрунту для заданого базового положення трубопроводу. Базове рішення уточнюється шляхом додавання до нього корегуючого розв'язку, помноженого на коефіцієнт руху, який обмежує абсолютну величину максимальних переміщень за одну ітерацію, а також залежить від зміни напрямку корегуючих переміщень у порівнянні з такими на попередній ітерації. Вважається, що отримано правильний розв'язок, якщо корегуючий розв'язок повністю співпадає з базовим розв'язком.

Розрахунок та моніторинг НДС реального газопроводу. З використанням чисельної процедури виконано розрахунок ділянки магістрального газопроводу-відводу Ду 300 до м. Тернівка, що знаходиться в зоні впливу шахтної лави 917 ПрАТ «ПАВЛОГДАДВУГІЛЛЯ». В якості вхідної інформації використовувались значення поздовжніх зміщень поверхні ґрунту вздовж осі газопроводу-відводу в результаті повного відпрацювання шахтної лави.

На рис. 3 представлено результати розрахунку НДС. Суцільною лінією зображено напружений стан магістрального газопроводу відводу в результаті повного відпрацювання шахтної лави 917. Штриховою лінією зображено напружений стан після впровадження заходів, спрямованих на зниження високого рівня напружень. Вказані заходи полягають у зменшенні сил взаємодії між поверхнею трубопроводу та ґрунтом шляхом виконання розкопок зі зворотною засипкою трубопроводу в зонах максимальної взаємодії між поверхнею трубопроводу та ґрунтом.

Для визначення ефективності розроблених заходів на основі тензометричних резисторів створено систему неперервного моніторингу напруженого стану для підземних газопроводів. З метою ефективного моніторингу в зонах максимальних напружень встановлено датчики, які оснащені системою збору та запису даних. Таким чином, до початку процесів зрушень земної поверхні виконано монтування двох датчиків в зонах максимальних розтягуючих напружень (датчики 1 та 3, див. рис.3) та одного в зоні максимальних стискаючих напружень (датчик 2, див. рис.3). Максимальні напруження в місцях встановлення датчиків, вимірними протягом всього періоду активної фази зміщень ґрунту представлені на рис. 3 і добре погоджуються з прогнозними розрахунковими даними. Результати моніторингу напруженого стану ділянок газопроводу-відводу в часі представлено на рис. 4.

Висновки. Для моделювання напружено-деформованого стану трубопроводу в середовищі використана ефективна чисельна ітераційна процедура з врахуванням пружно-пластичної моделі взаємодії поверхні трубопроводу та ґрунту.

З метою оцінки ефективності проведених заходів по зниженню високих напружень розроблено автоматичну систему вимірювань та неперервного запису деформацій газопроводу в часі. Система моніторингу встановлена на ділянках магістрального газопроводу-відводу Ду300 до м.Тернівка, що зазнають впливу зрушень земної поверхні від виробітки лав ПрАТ «Павлоградвугілля».

Результати моніторингу напруженого стану засвідчили коректність розрахункових методів аналізу та дозволили дослідити процеси релаксації напружень в часі після виходу шахтної лави із зони впливу на газопровід. Зазначимо, що процес релаксації швидше протікає в зонах розтягуючих напружень, ніж в зонах стискаючих напружень. Отримані дані щодо релаксації напружень будуть використані в подальших дослідженнях при розробці законів релаксації напружень та врахування історії навантаження МГ.

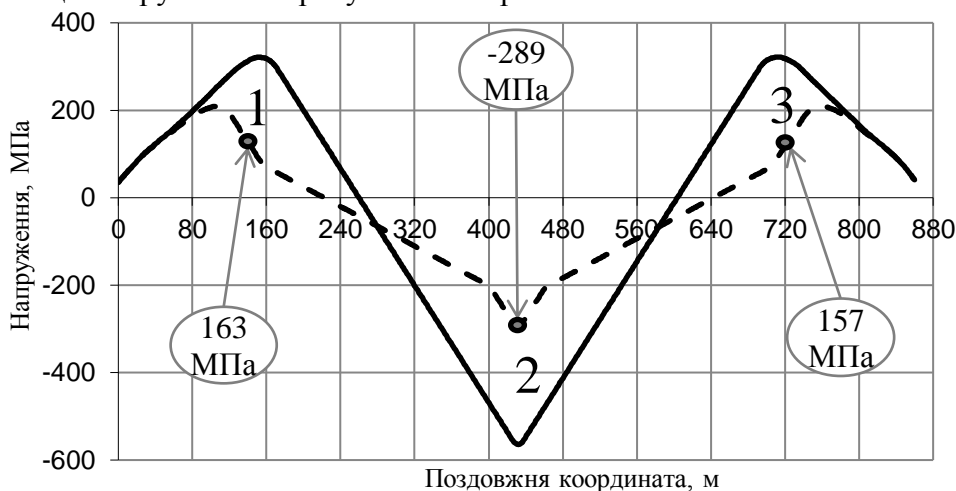


Рис. 3. Значення напружень від виробітки шахтної лави 917 ПрАТ «ПАВЛОГДАДВУГІЛЛЯ».

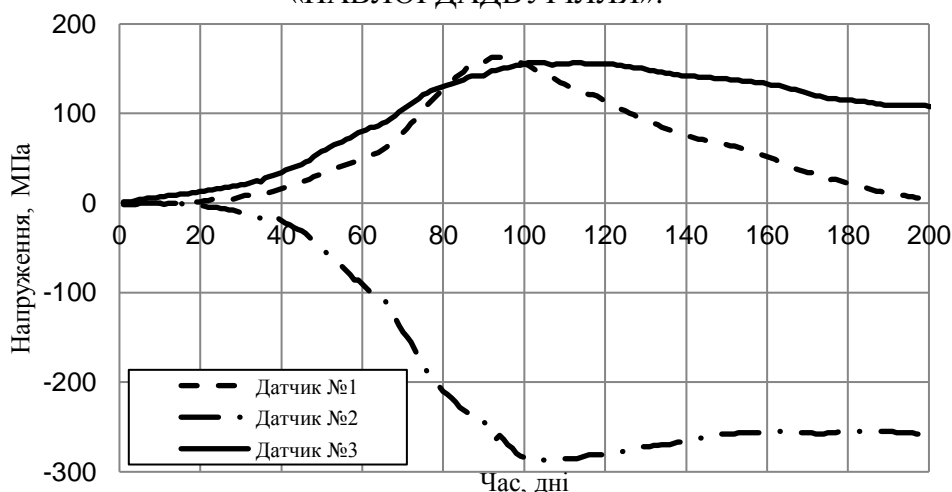


Рис. 4. Результати моніторингу напружень від виробітки шахтної лави 917 в часі.

Література

1. Сакун М.Ю. Система спостережень та захисту магістральних газопроводів, які підробляються вуглевидобувними шахтами // Нафт. і газова пром-сть.- 2006.-№4.- С. 45-48.
2. Орыняк И.В., Богдан А.В. Проблема больших перемещений подземных трубопроводов. Сообщение 1. Разработка численной процедуры //Проблемы прочности. – 2007. – №3.- с. 51-74.
3. Камерштейн А.Г., Рождественский В.В., Ручимский М.Н. Расчет трубопроводов на прочность. Справочная книга. — М.: Государственное научно-техническое издательствонефтяной и горно-топливной литературы, 1963. — 424 с.
4. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe //AmericanLifelinesAlliance. July 2001. – 76 p.
5. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость/ Справ. Пособие. – М.: Недра, 1991. – 287с