

УДК 528.48

д.т.н., професор Чибіряков В. К.,
к.т.н., проф. Староверов В. С., Нікітенко К. О.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ПОРЯДОК ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО -ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ СПОРУД В ҐРУНТОВІЙ ОСНОВІ

Розглянуто і проаналізовано загальний порядок визначення напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів в ґрунтовій основі. Запропоновано рекомендації щодо підвищення точності виконання геодезичних робіт в геологічних умовах.

Ключові слова : магістральний трубопровід (МТ), напружено-деформований стан (НДС), зсув.

Постановка проблеми. Відомо, що нормальна експлуатація магістральних трубопроводів залежить багато в чому не тільки від правильної підтримки всіх технологічних параметрів режиму роботи, а й від впливу різних зовнішніх факторів.

У гірських районах основним фактором, що порушує нормальне функціонування магістральних трубопроводів, є дія силового поля, викликане зсувними та ерозійними процесами.

Досвід експлуатації магістральних трубопроводів показує, що недооцінка впливу зазначених вище факторів призводить до руйнування трубопроводів, що призводить до економічних витрат, а також до забруднення навколишнього середовища.

Для здійснення всіх практичних завдань, пов'язаних з використанням магістральних трубопроводів та розробки захисних заходів необхідно мати об'єктивну і достовірну інформацію про деформації трубопроводу, а також розвитку зсувних та ерозійних явищ. Найважливішою складовою, яка відповідає за міцність трубопроводу, є напружено-деформований стан (НДС) трубопроводу і його зміна під впливом експлуатаційних і природно-кліматичних факторів.

Таким чином, за результатами оцінки та моніторингу НДС лінійної частини трубопроводів можна знизити рівень діючих напружень в трубопроводі і уникнути аварійної ситуації.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз існуючих методів визначення напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів в ґрунтовому масиві, а також розробка математичної моделі та метода оцінки

напружено-деформованого стану (НДС) потенційно небезпечних ділянок магістральних трубопроводів, що експлуатуються в складних умовах і при наявності деформацій, що дозволить вирішити актуальну наукову проблему моделювання точності геодезичних робіт при проведенні моніторингу трубопроводів на стадії їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Магістральний трубопровід (МТ) - конструкція лінійного типу, що представляє собою безперервну трубу, уздовж якої розміщуються інженерні споруди, що забезпечують перекачку продукту, що транспортується при заздалегідь заданих параметрах (тиску, температури, пропускної спроможності і т. д.). МТ протягом усього терміну експлуатації знаходиться в складному напруженому стані під дією внутрішнього тиску перекачування, його роботу можна порівняти з посудиною високого тиску. Перекачка нафти, газу, бензину та подібних речовин, робить його до того ж надзвичайно енергонасиченою спорудою. Це необхідно мати на увазі при визначенні складу і ролі споруд магістрального трубопроводу в забезпеченні надійності експлуатації і зменшення енергетичних втрат у випадках можливих порушень труб.

Як відомо, МТ складається з головних споруд, лінійної частини, проміжних перекачувальних або компресорних станцій, устаткування кінцевих пунктів і т. д. відмову в роботі будь-якого з цих елементів призводить до зупинки транспорту продукту, проте систематизація та аналіз фізичної природи надійності трубопроводу показує, що вирішальний вплив на надійність даної системи надає надійність її лінійної частини. Магістральні трубопроводи, незважаючи на зовнішню конструктивну простоту, принципово відрізняються від інших споруд складною схемою діючих силових факторів, отже, невизначеністю рівня напружено-деформованого стану, масштабністю і т. д., що збільшує ймовірність виникнення відмов роботи конструктивних елементів [1].

Аналіз складності конструкції (МТ) зумовлює великий обсяг робіт із забезпечення її надійного функціонування. Тому підвищення надійності лінійної частини стає актуальною проблемою на всіх етапах: проектування, спорудження та експлуатації трубопровідних систем. Особливо важливо встановити адекватність поведінки спорудженого трубопроводу під дією експлуатаційних і зовнішніх впливів в розрахунковій схемі, прийнятій в нормах і правилах, тобто необхідно дослідити конструктивну надійність магістральних трубопроводів.

На перший план вирішення проблеми про надійність висувуються завдання розрахунку на міцність, стійкість, довговічність. Для їх вирішення необхідні: інформація про навантаження і впливи на трубопровід, аналіз

напружено-деформованого стану, що в підсумку дозволить зробити розрахунки надійності та ресурсу.

Аварійні ситуації в роботі магістральних трубопроводів нерідко виникають через недостатню точність виконання інженерно-геодезичних робіт при дослідженнях і будівництві. Не виключена можливість відхилення фактичного положення трубопроводу в плані як внаслідок похибок геодезичного розмічування, так і за рахунок відхилення при розробці траншей і зварюванні стиків. Це призводить до додаткових напружень в стінках труби.

Дані про напруги можна одержати тільки в окремих точках, тому для характеристики напруженого стану трубопроводу важливо фіксувати виникаючі відхилення від проектного або первісного положення трубопроводу геодезичними методами. Знаючи розрахункові допустимі відхилення при досягненні деформацій, необхідно вживати заходи для запобігання руйнувань.

Періодичний геодезичний контроль, обстеження та поточний ремонт проводять, як правило, на всіх відповідальних спорудах, в тому числі і лінійних: залізних і автомобільних доріг, ліній електропередач і зв'язку. Підземні магістральні трубопроводи такому контролю і обстеженню не піддають, а профілактичні заходи по виправленню відхилень від проектного положення трубопроводу виконують тільки у випадках явних порушень: спливання і виходу його на поверхню. Положення трубопроводу в ґрунтовому масиві, стабільність, повинні бути предметом геодезичного нагляду. Використання сучасної маркшейдерсько-геодезичної техніки дозволяє забезпечити такий контроль, а отже, довгострокову і надійну роботу магістральних трубопроводів.

Основна мета інженерно-геодезичного обслуговування будівництва забезпечити сувору відповідність будівельно-монтажних робіт всім геометричним вимогам проекту. Якість будівництва, довговічність будівель і споруд багато в чому залежать від організації геодезичних робіт. Налагоджена геодезична служба дозволяє своєчасно задовольняти запити будівельних і монтажних підрозділів як на початку, так і в процесі зведення споруд. Все це сприяє підвищенню якості робіт, своєчасному виявленню неприпустимих відхилень від проекту, прискоренню будівництва і, як наслідок, скорочення матеріальних витрат [2].

Наявність навіть незначних відхилень осі трубопроводу від проектною лінії може привести до випучення труб з ґрунту, до руйнування і аварії, що найбільш часто спостерігається в місцях повороту траси. Стріла прогину трубопроводу іноді складає 3-4 м.

Поперечні переміщення (перпендикулярні до головної осі) відбуваються в результаті осідання трубопроводів. Спостерігаються такі явища при укладанні

трубопроводу в слабких болотистих ґрунтах, в шарі торфу, в ґрунтах багаторічної мерзлоти при їх відтаванні. Як показує досвід експлуатації, поперечні переміщення труб досягають 2 м.

Трубопровід, що знаходиться в зсувному масиві, піддається силовому впливу ґрунту і сам пересувається разом з ним. При певних умовах можливі руйнування труб на ділянках зсуву.

Постановка геодезичних спостережень за деформаціями трубопроводів вимагає певної геодезичної основи на трасі на період його експлуатації. Практично на діючих трубопроводах немає такої опорної геодезичної мережі, яка за місцем розташування і своєї точності дозволила б вести зазначені спостереження.

Таким чином, для забезпечення систематичних геодезичних спостережень за деформацією трубопроводу створюється планово-висотна геодезична основа і забезпечується необхідна точність геодезичних робіт при інженерних вишукуваннях - трас трубопроводів, а замовник забезпечує збереження геодезичних знаків після будівництва.

Після аналізу причин пошкоджень трубопроводу, викликаних зміною його положення, для збільшення експлуатаційної надійності трубопроводу розглянемо напруги в трубопроводі, що виникли від зовнішніх впливів.

Для лінійної частини трубопроводу основними навантаженнями є: внутрішній тиск, тиск ґрунту, власна вага труб і продукту, а з дій - зміна температури, просадка і розрідження ґрунту, тиск сповзаючих ґрунтів.

Внутрішнім називають зусилля в стінці труби в будь-якому перерізі. Поздовжнім називають зусилля P , що діє у напрямку поздовжньої (головної) осі трубопроводу.

Частина повного поздовжнього зусилля P , яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу трубопроводу, називають поздовжньою напругою:

$$\sigma_{\text{поздов.}} = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

де F - площа поперечного перерізу матеріалу труби, що залежить від діаметра і товщини стінки.

Зусилля, що діють в тангенціальному напрямку, називають кільцевими, і відповідно напругу також називають кільцевою.

На рис. 1 зображений розріз ділянки труби з діючими в її матеріалі поздовжніми і кільцевими напругами. Ці напруги в працюючому трубопроводі не залишаються незмінними.

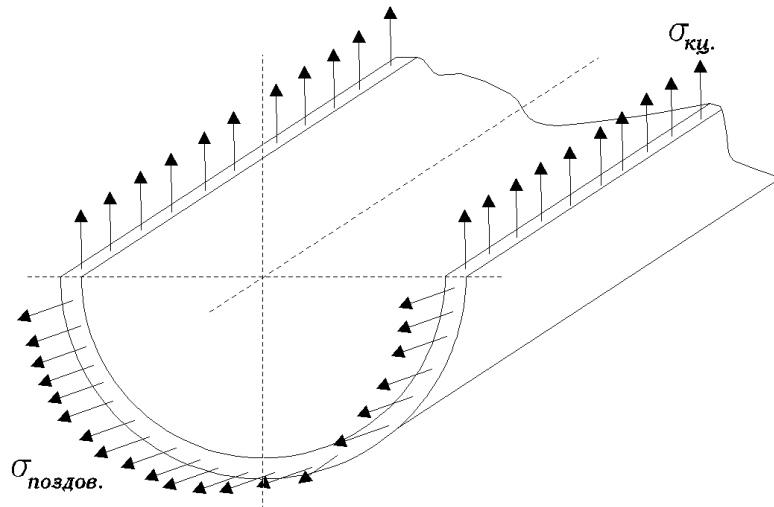


Рис. 1. Схема внутрішніх зусиль у трубопроводі.

Розглянемо рис.2. Напружений стан прямолінійного трубопроводу, розташованого в ґрунті, який піддається впливу тиску ґрунту q [4].

Згинальні моменти M і кільцеві зусилля N в стінці труби можна визначати за формулами, отриманими О. Є. Бугаєвой:

$$M = qr_{\text{зовн.}} r_{\text{сер.}} [A_1 a + B_1 + C_1 n_1 (1 + a)]; \quad (2)$$

$$N = qr_{\text{зовн.}} [D_1 a + E_1 + F_1 n_1 (1 + a)], \quad (3)$$

де $r_{\text{зовн.}}$ - зовнішній радіус труби; $r_{\text{сер.}}$ - середній радіус труби

$$a = 2 - \frac{r_{\text{зовн.}}}{r_{\text{сер.}}}; \quad (4)$$

$A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1$ - коефіцієнти приймаються за табл. 1.

Для тонкостінних труб $a \approx 1$;

$$n_1 = \frac{1}{0.064 + \frac{EI}{r_{\text{сер.}}^3 r_{\text{зовн.}} kb}}; \quad (5)$$

$b = 1$ см - ширина кільцевої смуги виділяється з труби;

k - коефіцієнт пружності ґрунту, навколо труби;

I - момент інерції перерізу труби;

E - модуль пружності.

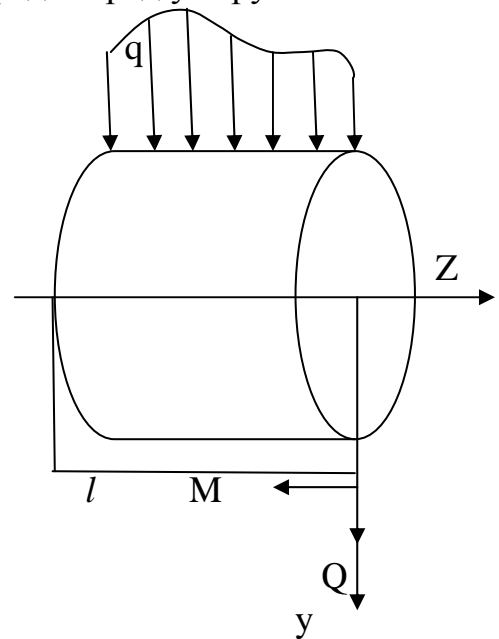


Рис. 2. Схема навантаження на трубу.

Таблиця 1. Коефіцієнти рівнянь (2) і (3)

β	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1
0	0,1628	0,0872	-0,0070	0,2122	-0,2122	0,021
$\pi/4$	-0,025	0,025	-0,00084	0,15	0,35	0,0148
$\pi/2$	-0,125	-0,125	0,00825	0	1	0,00575
$3\pi/4$	0,025	-0,025	0,00022	-0,15	0,9	0,0138
π	0,0872	0,1628	-0,00837	-0,2122	0,7122	0,224

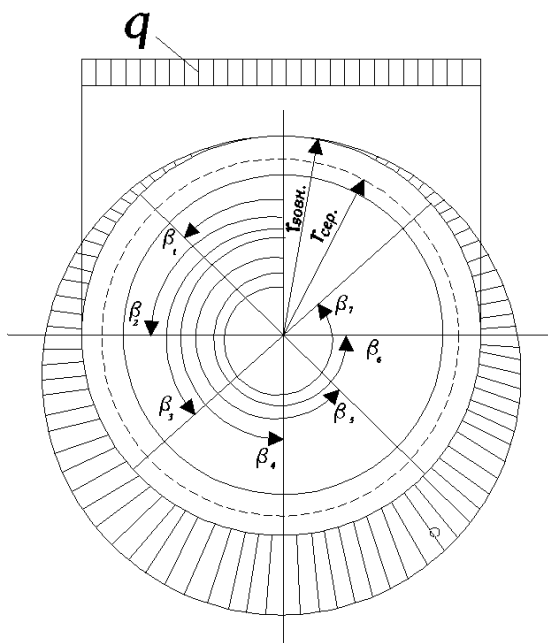


Рис. 3.Схема навантаження на підземний трубопровід.

Формули (2) і (3) отримані в припущенні, що тиск ґрунту рівномірно розподілено по всій поверхні півкола труби.

При деформації труби з боку ґрунту в межах окружності від $\beta_1 = \frac{\pi}{4}$ до $\beta_7 = \frac{7}{4}\pi$ на трубу діє пружний відсіч (Рис.3)

$$\varphi(\beta) = k w(\beta) \quad (6)$$

де $w(\beta)$ - переміщення стінки труб від навантаження q .

Визначення M і N , можна знайти за відомими формулами опору матеріалів [6].

У підземному трубопроводі, як правило, виникає поздовжня сила P (від перепаду температури і внутрішнього тиску p). Ця сила для прямолінійного трубопроводу при неможливості поздовжніх (в напрямку головної осі) переміщень труб визначається за формулою:

$$P = \alpha_i E F \Delta t - 0.15 \frac{p D_{\text{зовн.}} F}{\delta}, \quad (7)$$

де α_i - коефіцієнт лінійного розширення металу; P - площа перерізу матеріалу труби; $\Delta t = t_0 - t_1, t_0, t_1$ - початкова температура; t_1 - температура у даний момент часу; δ - товщина стінки труб. Формулу (7) можна представити в іншому вигляді:

$$P = \alpha_i E F \Delta t - 0.15 \pi p D_{\text{зовн.}}^2 \cdot \quad (8)$$

Розглядаються стискаючі зусилля, а не розтягуючі. При значенні $P \geq P_{кр}$ можливий перехід трубопроводу з прямолінійного в викривлений стан. Цей перехід називають втратою стійкості трубопроводу, а силу, при якій відбувається втрата стійкості - критичною силою $P_{кр}$.

Така значна сила може привести до втрати трубопроводом стійкості. Щоб передбачити ще в процесі проектування можливість втрати стійкості, необхідно мати відповідні методики розрахунку. Вперше теоретичні та експериментальні дослідження з поздовжньої стійкості підземних трубопроводів були виконані П. П. Бородавкіним і Л. І. Биковим.

Аналіз формул (2), (3) і (8) дає можливість диференційовано підходити до міцності і стійкості трубопроводу. Як відомо умовою порушення міцності також вважається перехід матеріалу в пластичний стан і пов'язане з ним поява залишкових деформацій. Під міцністю трубопроводу можна розуміти здатність чинити опір внутрішнім і зовнішнім навантаженням без руйнування, а також без втрати необхідної форми або стійкості. Отже, є можливість визначити граничний стан конструкції. Перший граничний стан - несуча здатність, другий - гранично допустимі деформації.

Перший граничний стан характеризується в загальному вигляді залежністю:

$$nN^{(n)} \leq f(R_i, S), \quad (9)$$

де $N^{(n)}$ - зусилля в конструкції від нормативних зовнішніх навантажень і впливів; R_i - одне з розрахункових опорів матеріалу; S - геометричні характеристики труб; n - коефіцієнт перевантаження.

Для другого граничного стану:

$$f \leq f_{дон}, \quad (10)$$

де f - деформація конструкції; $f_{дон}$ - допустима величина деформації.

Щоб правильно визначити ступінь небезпеки силового впливу ґрунтового масиву на трубопровід, необхідно встановити основні характеристики ґрунту, розрахувати напружений стан трубопроводу і визначити час, коли слід очікувати руйнування труб.

Розглянемо основний випадок силового впливу сповзання ґрунту на трубопровід [3].

Нехай трубопровід прокладено прямолінійно в зсуві на ділянці l . Якщо на ньому відбудуться поперечні переміщення ґрунту, то трубопровід до деякого моменту буде переміщатися разом з ґрунтом, викривляючись за формою жорсткої нитки під навантаженням $q(x)$. Оскільки швидкість руху різних перетинів трубопроводу не однакова, швидкість руху ґрунту щодо рухомого трубопроводу для різних перерізів також буде неоднаковою.

Якщо вважати, що швидкість руху зсуву ґрунту постійна у всіх перетинах, то при переході від перетину до перетину швидкість руху ґрунту v_{zp} щодо трубопроводу буде визначатися різницею між постійною швидкістю v_{zp} і змінною швидкістю переміщення трубопроводу v_{mp} , тобто за умовою:

$$v_0(x) = v_{zp}(x) - v_{mp}(x). \quad (11)$$

Спостерігаються два види руху зсуву ґрунтів: дуже повільне, що має характер течії, і швидке, відбувається у формі досить швидких переміщень ґрунту.

Перший вид руху характерний для повільно розвиваючих зсувів, швидкість руху яких становить кілька сантиметрів на рік. Це дає підставу припустити, що швидкість руху ґрунту зростає рівномірно ширині зсуву, а отже, залежність (11) можна прийняти як робочу гіпотезу, в якій є лише одне припущення: сталість по ширині зсуву.

Для визначення переміщень і напруженого стану трубопроводу, розташованого в зсуві розглянемо розрахункову схему показану на рис. 7.

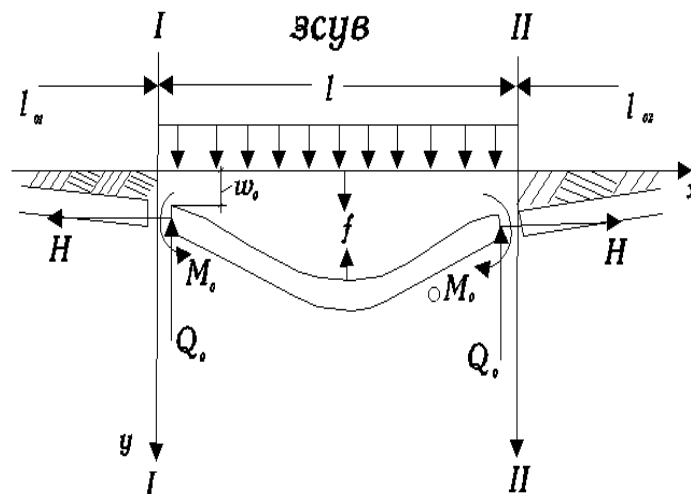


Рис. 4. Схема до розрахунку трубопроводу в зсуві.

При складанні диференціального рівняння прогину ділянки l приймають, що після утворення зсуву викривлення труб може відбуватися за рахунок їх подовження в межах ділянки l , а також ділянок l_0 , що примикають до нього, та усунення початкової «слабині», що утворюється при укладанні трубопроводу. Крім того, мають на увазі, що граничні умови на кінцях ділянки l визначаються роботою прилеглих ділянок, що розглядаються як напівнескінченні балки в пружному середовищі, властивості яких характеризуються коефіцієнтами пружності ґрунтової основи k_{u1} і k_{o1} на одному березі зсуву k_{u2} і k_{o2} - на іншому березі. Приймаючи $k_{o1} = k_{o2} = k_o$, запишемо диференційні рівняння прогину:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_0 + P(y - w_0) - x \int_0^l \frac{q(x, v_0) dx}{2} + \int_0^x q(\xi, v_0)(x - \xi) d\xi, \quad (12)$$

де M_0 - згинальний момент в перерізах $I-I$ і $II-II$; P - поздовжнє зусилля в тих же перерізах; w_0 - прогин трубопроводу в перерізах $I-I$ і $II-II$, і $q(x, v_0)$ - інтенсивність розподіленого навантаження в перерізах x і ξ .

Силовий тиск ґрунту досягає повного значення перш за все в околицях граничних перерізів $x = 0$ і $x = l$, так як після прояву пружних деформацій ґрунту поперечне переміщення трубопроводу в перетинах $x = 0$ і $x = l$ практично припиняється. Інші перетини продовжують переміщатися разом з обвалом, причому в міру зменшення швидкості руху трубопроводу в перетинах, більш близьких $x = 0$ і $x = l$, зростає відносна швидкість v_0 . При деякому значенні прогину трубопроводу тільки в перерізі $x = l / 2$ відносна швидкість буде близька до нуля. Оскільки рух обвалу буде продовжуватися, а рух трубопроводу затухати, то поступово v_{mb} буде прагнути до нуля у всіх перетинах, а при повній зупинці трубопроводу $v_0 = v_{mb}$, тобто епіюра швидкості, а отже, і тиску ґрунту буде рівномірною. Саме в цей момент напружений стан трубопроводу буде найбільш небезпечним, а переміщення його найбільш значними.

Приймаючи відповідно до викладеного $q = const$, одержимо диференціальне рівняння прогину (12) виду:

$$EIy'' = M_0 + P(y - w_0) + \frac{qx^2}{2} - \frac{qlx}{2}. \quad (13)$$

Запишемо його у формі:

$$y'' - k^2 y = \frac{k^2}{P} \left(M_0 - Pw_0 + \frac{qx^2}{2} - \frac{qlx}{2} \right). \quad (14)$$

Вирішуючи диференціальне рівняння (14) знаходимо q - силовий вплив зсуву ґрунту на циліндр (трубопровід) при поперечному його обтіканні. Величина q залежить від швидкості руху ґрунту. Якщо рух ґрунту має характер повзучої течії, то силовий тиск ґрунту можна знайти за формулою:

$$q = \frac{4\pi\eta V}{2 - \ln Re}, \quad (15)$$

$Re = V \cdot D_{зовн.} / \nu$ - число Рейнольдса (тут $D_{зовн.}$ - зовнішній діаметр труб; ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості); V - швидкість руху зсуву ґрунту на глибині розташування трубопроводу; η - динамічний коефіцієнт в'язкості.

Таким чином, для визначення q необхідно знати швидкість руху зсуву ν і динамічний коефіцієнт в'язкості.

Тоді швидкість руху зсуву буде мати вигляд:

$$V = \frac{\gamma_{\text{природ.}}}{2\eta} H^2 (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi), \quad (16)$$

де φ -кут внутрішнього тертя зсуву ґрунту; η -коефіцієнт зчеплення ґрунту (динамічна в'язкість); H -глибина зсуву; α -кут нахилу схилу.

Аналіз формули (16) дає можливість диференційовано підходити до визначення деформації зміни напруги в трубопроводі. Отже, по впливу зсувних мас ґрунту на трубопровід, можна визначити мінімальну довжину в зсувному масиві, при якій можлива поява критичних напружень. Таким чином, якщо будуть виявлені ділянки на яких можливі зрушення ґрунту, то на них доцільно організувати постійні наглядові станції для вивчення динаміки зсувних процесів і деформації трубопроводу. Наглядова станція представляє собою систему точок, закріплених на місцевості за допомогою забивних металевих реперів, застосування яких забезпечує можливість виконання безпосередніх вимірювань. Таким чином, спостерігається система точок, закріплених на місцевості реперами, що охоплює зону розлому, зсуву, яка за припущенням і даними попередніх експериментів, повинна володіти найбільшою активністю.

В залежності від умов навантаження, спирання та цілей розрахунку елементи трубопроводу приводяться до наступних розрахункових схем: симетрично навантажена оболонка в пружному середовищі, стрижень в пружному середовищі, балка, балка на пружній основі, балка в жорстко-пластичному середовищі, брус малої кривини в пружному середовищі, циліндрична оболонка з криволінійною віссю, жорстка нитка, жорстка нитка в пружному середовищі, пов'язані циліндричні оболонки.

Розглянемо розрахункову модель напружено-деформованого стану (НДС) труби. Уявімо трубопровід у вигляді балочної системи, що деформується в пружній або в пружно-пластичній середі, і для його розрахунку міцності можна застосувати метод ортогональної прогонки Годунова С. К. (метод дискретної ортогоналізації), чисельний метод рішення, заснований на приведенні крайової задачі до завдань Коші та забезпечення чисельної стійкості обчислювального процесу за рахунок ортогоналізації [5].

Як відомо, ділянка траси в якій знаходиться трубопровід складається з різних типів ґрунтів, а сам трубопровід зварений з прямолінійних і криволінійних труб, які відрізняються діаметром і товщиною стінки, а також маркою сталі. Трубопровід деформується спільно з ґрунтом під дією власної ваги з газом, ваги ґрунту, що знаходиться на трубі, а також експлуатаційних навантажень: внутрішнього робочого тиску і перепаду температури. За рахунок неоднакової жорсткості ґрунту основи і його несучої здатності на одних частинах розрахункової ділянки траси трубопроводу ґрунт може деформуватися в пружній області, а на інших - він може вичерпати свою несучу здатність, де прогини трубопроводу по величині можуть бути рівними радіусу труби.