

## ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ У ҐРУНТАХ, ЩО НАБРЯКАЮТЬ

<sup>1</sup>В.О. Онищенко, <sup>1</sup>М.Л. Зоценко, <sup>2</sup>Л.С. Шлапак, <sup>1</sup>О.Л. Зімін

<sup>1</sup>Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,  
36011, м. Полтава, пр. Першотравневий, 24, e-mail: 60k@pntu.edu.ua

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506612,  
e-mail: snp@nimg.edu.ua

На дослідній ділянці магістрального трубопроводу, яка розташована на Керченському півострові Криму, проведено польові і лабораторні дослідження властивостей набрякання караганських і конкських неогенових глин. Польові дослідження проводилися на ділянці металевого трубопроводу і полягали у тривалому спостереженні за його деформуванням внаслідок зволоження ґрунтової основи атмосферними водами за допомогою повторного нівелювання поверхневих марок III класом точності за профілем трубопроводу. Лабораторні дослідження неогенових глин полягали у визначенні їх петрографічних особливостей та характеристик набрякання.

Глиниста фракція глин складена переважно монтморилонітом, який має рухливу електронну ґратку, що розширюється у міру зволоження. Глиниста фракція складала близько 85%. Глини характеризуються високим вмістом тонкодисперсної фракції (менше 0,001 мм), за теплою зволоження вони відносяться до середньо гідрофільних порід, а їх тонкодисперсна фракція є високогідрофільною.

Внаслідок проведених натурних досліджень встановлено максимальне значення піднімання трубопроводу при набряканні караганських і конкських глин. Отримані результати близькі до тих, що були розраховані за нормативною методикою з використанням даних лабораторних досліджень.

Встановлено також, що караганські глини значно більше набрякають, ніж конкські. Також доведено, що за відсутності зворотнього засипання деформація набрякання ґрунтової основи внаслідок атмосферного зволоження удвічі більша, ніж за її наявності.

При складанні розрахункових схем у процесі проектування конструкцій трубопроводів, які споруджуються у районах розповсюдження ґрунтів, що набрякають, слід враховувати можливі нерівномірності деформацій за довжиною труби, які за певних умов можуть призвести до значної концентрації тисків на трубу.

Ключові слова: неогенові глини, монтморилоніт, гідрофільність, геометричне нівелювання.

На опытном участке магистрального трубопровода, расположенного на Керченском полуострове Крыма, проведены полевые и лабораторные исследования свойств набухания караганских и конкских неогеновых глин. Полевые исследования заключались в прокладке участка металлического трубопровода и длительном наблюдении за его деформацией вследствие увлажнения основания атмосферными водами. Эти наблюдения состояли в повторном нивелировании III класса точности поверхностных марок по профилю трубопровода. Лабораторные исследования неогеновых глин заключались в определении их петрографических особенностей, а также характеристик набухания.

Глинистая фракция глин состоит преимущественно из монтмориллонита, который имеет подвижную электронную решетку, расширяющуюся при увлажнении. Содержание глинистых частиц достигает 85%. Глины характеризуются высоким содержанием тонкодисперсной фракции (менее 0,001 мм), по теплоте смачивания они относятся к среднегидрофильным породам, а их тонкодисперсная фракция является высокогидрофильной.

В результате проведенных натурных исследований установлено максимальное значение подъема трубопровода при набухании караганских и конкских глин. Полученные результаты близки к рассчитанным по нормативной методике с использованием данных лабораторных исследований.

Установлено также, что караганские глины значительно больше набухают, чем конкские. Также доказано, что при отсутствии обратной засыпки деформация набухания вследствие атмосферного увлажнения глин в 2 раза больше, чем при ее наличии.

При составлении расчетных схем при проектировании конструкций трубопроводов, проложенных в районах распространения набухающих ґрунтов, следует учитывать возможные неравномерности деформаций по длине трубы, которые при определенных условиях могут привести к концентрации значительных давлений на трубу.

Ключевые слова: неогеновые глины, монтмориллонит, гидрофильность, геометрическое нивелирование.

In the research section of the main pipeline located on Kerch peninsula field and lab studies have been carried out in order to determine swelling properties of karahansk and konsk Neogene clays. Fields studies were conducted in the metal pipeline area and involved long last observation of its strain due to wetting the ground base with meteoric water. These observations consisted of the second line levelling with 3 accuracy rating of surface filling marks along the pipeline profile. The lab studies of Neogene clays involved determination of their petrographic and swelling characteristics.

Clay fraction is composed mainly of montmorillonite which has a moving electronic grid that expands because of moisture. The content of clay particles reaches appr. 85%. Clays are distinguished by the big amount of fine-graded fraction (less 0.001mm), according to the thermal wetting they belong to medium water-saturated formation and their fine-graded fraction is highly hydrophilic.

As a result of conducted outdoors researches max. value of pipeline rise has been determined during karahansk and konsk clays swelling. The obtained results are similar to those which were calculated according to the normative technique using lab research data.

It has been established that karahansk clays swell much more than konsk ones. It was also proved without backfill strain of ground base swelling caused by atmospheric moistening was twice bigger than in fact.

Making up design schemes in the process of structural design of the pipelines being constructed in the districts of swelling soils distribution one should take into account possible uniniformity if strains along the pipe which under the certain conditions can cause significant concentration of pressure on the pipe.

Keywords: Neogene clays, montmorillonite, hydrophilicity, geometric leveling.

**Постановка проблеми.** Основною конструкцією магістральних трубопроводів для транспортування нафти чи газу є труба, звичай укладена безпосередньо у ґрунт. Протягаючись на сотні кілометрів, трубопровід знаходиться у різноманітних інженерно-геологічних умовах, які у багатьох випадках можуть бути несприятливими для експлуатації усієї споруди з точки зору виникнення значних, і навіть непередбачуваних, деформацій основи. Усі ці умови можна поділити на звичайні, коли деформації основи можливо передбачити на підставі достовірних даних про інженерно-геологічну будову ділянки трубопроводу з використанням нормативних рекомендацій щодо визначення її вірогідних деформацій, і так звані складні інженерно-геологічні умови будівництва та експлуатації трубопроводів, пов'язані з дією карстових та суфозійних утворень, чи прокладених в ґрунтах з особливими властивостями: тих що просідають, набрякають, засолені, з органічними домішками тощо. В таких складних умовах передбачити реальні деформації споруд магістральних трубопроводів, особливо на підставі теоретичних рішень, як свідчить досвід, практично неможливо.

Для обґрунтування робочої документації магістральних трубопроводів у складних інженерно-геологічних умовах випробовування проводять на дослідних ділянках, які споруджують у натуральну величину. При цьому штучно створюють найбільш несприятливі умови будівництва й експлуатації споруди.

Науковці Полтавського НТУ проводили спостереження за деформаціями на дослідній ділянці трубопроводу, який було побудовано на глинистих ґрунтах, що набрякають. Особливість ґрунтів, що набрякають, полягає у тому, що при зволоженні вони збільшуються в об'ємі. При цьому виникають деформації, що протилежні за напрямком гравітаційним силам. Такі деформації основи завдають спорудам більше шкоди, ніж переміщення, пов'язані з осіданням основи. Деформації ґрунтів, що набрякають, ще недостатньо вивчені, особливо польовими методами досліджень [3,14].

Розповсюджені такі ґрунти доволі широко. У центральній і південній Україні, на водорозділах вони залягають з глибини 15 до 25 м під товщею четвертинних відкладів. На схилах балок і річкових долин їх можливо зустріти у вигляді делювію неогенових глин. У деяких районах (наприклад, на Керченському півострові

Криму) вони залягають у вигляді елювіальних відкладень безпосередньо з поверхні Землі [4]. Отже, вивчення умов будівництва і експлуатації магістральних трубопроводів в умовах розповсюдження ґрунтів, що набрякають, є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень.** Останні роки у Криму побудовано магістральний газопровід Джанкой-Феодосія-Керч. Велика частина траси трубопроводу проходить по території Керченського півострову, який розташований у периферійній області східного занурення Кримської антиклінальної споруди.

Територія півострова поділена на два райони: південно-західний (рівнинний) і північно-східний. Природною межею між ними є Перлачський гребінь. Надалі розглядатимемо лише північно-східний район Керченського півострова.

Рельєф району – горбисто-грядовий зі складним сполученням орієнтованих у субширотному напрямку антиклінальних котловин, які обмежені скельними вапняковими гребнями, і синклінальних долин, які їх розділяють. Антиклінальні котловини приурочені до ядер антикліналей, які складені у більшості випадків глинами майкопської серії. У антиклінальних котловинах глини частково розмиті. У геологічній будові району в більшості випадків біля поверхні переважають утворення неогенової системи, а саме верхня майкопська, караганська, конкська та сарматська глини, які володіють властивостями набрякання. Потужність цих відкладів перевищує 1200 м [4].

Ґрунти, що набрякають, характеризуються тиском набрякання  $p_{sw}$ , вологістю набрякання  $w_{sw}$ , відносним набряканням при заданому тиску  $\varepsilon_{sw}$  і відносним осіданням при висиханні  $\varepsilon_{sh}$  [11].

Неогенові глини темно-сірі і строкаті, тверді і напівтверді з прошарками вапняків потужністю від 0,05 до 1,0 м. За ступенем вивітрілості вони поділяються на три зони.

Перша елювіальна зона потужністю 13-15 м характеризується інтенсивною тріщинуватістю. Ширина тріщин, які заповнені переважно гіпсом, – до 5 см. Коефіцієнт тріщинуватості більше 3%.

Другий елювій потужністю 9 м характеризується значно менш інтенсивною тріщинуватістю, ніж перший. Коефіцієнт тріщинуватості – до 1%.



Рисунок 1 – Схема розташування дослідної ділянки трубопроводу

Третя зона глин не пошкоджена елювіальними процесами.

Четвертинні відклади розповсюджені за всією площею, крім невеликих ділянок крутих схилів. Представлені вони переважно рослинним шаром товщиною до 0,6 м, а на пологих схилах елювіальними і алювіально-делювіальними глинами та суглинками з включеннями уламків вапняку та гнізд гіпсу. Потужність цих відкладів не перевищує 3 м.

Неогенові глини Керченського півострова характеризуються субаквально-гравітаційним типом діагенезу, при якому основним типом літифікації є гравітаційне ущільнення під дією ваги вище накопичених відкладів [7].

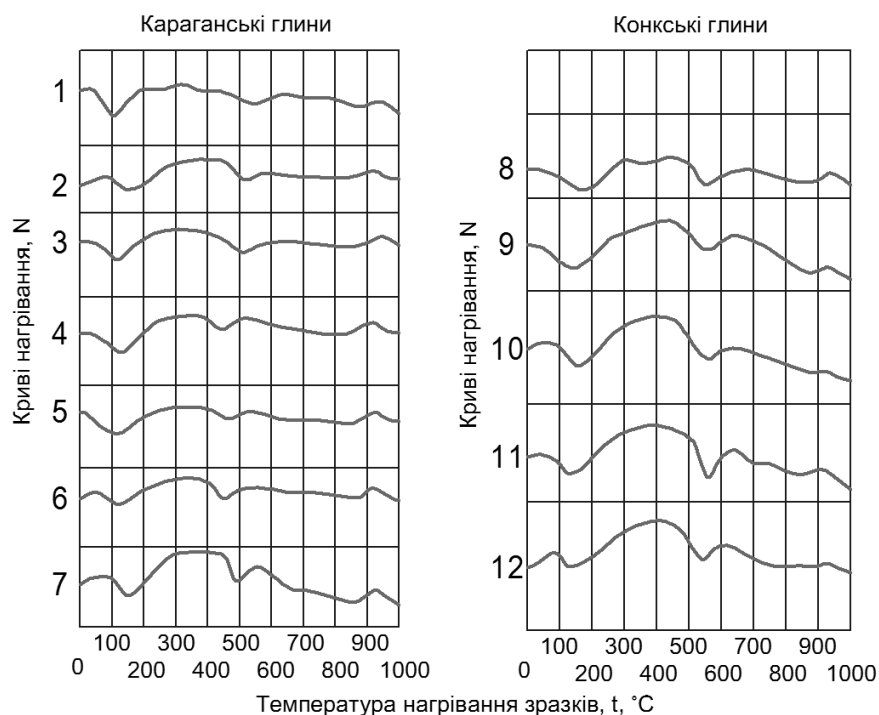
**Формулювання мети роботи.** Метою цієї роботи було дослідження умов експлуатації металевих трубопроводів, основою якого є ґрунти, що набрякають. Для цього в лабораторних умовах необхідно було дослідити властивості ґрунтів, що набрякають, і перевірити прогнози у польових умовах на дослідній ділянці трубопроводу великого діаметру. При цьому необхідно передбачити такі умови експлуатації трубопроводу на дослідній ділянці, які б були реальні і найбільш несприятливі з точки зору конструктивної роботи труби. У подальшому ці дані планують використати при проектуванні магістральних трубопроводів в умовах залягання ґрунтів, що набрякають.

**Виклад основного матеріалу.** З метою дослідження впливу набрякання ґрунтів на умови експлуатації металевих трубопроводів було побудовано дослідну ділянку, схему розташування якої наведено на рис. 1. Були прове-

дені широкомасштабні дослідження деформування металевих труб великого діаметру внаслідок штучного зволоження її основи. При цьому впродовж усього часу проведення дослідів труба була порожньою, а в траншеї не було проведено зворотного засипання. Такі умови дослідів сприяли отриманню найбільшої величини деформації набрякання основи, що можливо у період будівництва чи ремонту магістрального трубопроводу.

В геоморфологічному відношенні дослідна ділянка трубопроводу розташована у межах ерозійного зниження центральної частини Ново-Миколаївської антикліналі. В геологічному відношенні – це неогенові шаруваті караганські та конкські глини – утворення платформ морського басейну. Накопичення їх відбувалося в умовах трансгресії моря, яке почалося у середньому міоцені внаслідок опускання території Криму. На території Керченського півострова у караганських відкладах виділяються дві фації: на сході – глинисті породи, а на заході – глинисто-карбонатні утворення.

Основа дослідної ділянки складала караганські і конкські глини. Геолого-літологічний аналіз території дослідної ділянки трубопроводу дозволяє виділити у формуванні механічних властивостей караганських і конкських глин три етапи. Перший етап охоплює час від середнього міоцену до сармату і характеризується ущільненням глин за усією площею під впливом поступово зростаючого гравітаційного тиску ущільнення (прогресивний петрогенез). Другий етап – від сармату до кінця пліоцену – характеризується утворенням складчастості, яка змінила умови залягання порід і внесла різну спрямованість у хід процесу петрогенезу. На



**Рисунок 2 – Диференційні криві нагрівання караганських та конкських глин. Фракції розміром менше 0,001 мм**

ділянках синклінальних западин, де продовжувалося накопичення осадів, глини ущільнювалися, а в ядрах антиклінальних структур глини розмивалися і разушільнювалися (регресивний петрогенез). Третій етап відноситься до четвертинного періоду, під час якого відбулося і зараз відбувається гравітаційне розушільнення й інтенсивне вивітрювання відкритих з денної поверхні неогенових глин.

Шляхом макроскопічного аналізу визначалися літологічні ознаки глин на зразках, які відбиралися у межах дослідної ділянки. Караганські глини зони інтенсивного вивітрювання характеризуються мінливим плямистим забарвленням: червоно-бурим, зелено-сірим, темно-сірим, темно-зеленим. Будова породи – тонкошарова. Вміст глинистої фракції – високий (більше 85%). Консистенція – напівтверда. Породу розбита тріщинами, які не мають певного орієнтування. Макроструктура грудково-плитчаста, тріщинувата. Текстура – тонкошарова, плямиста. У глині зустрічаються гнізда кристалічного гіпсу. Караганські глини зони утрудненого вивітрювання темно-сірі, темно-зелені, і чорного забарвлення, тонкошарові. Консистенція – напівтверда. Мікроструктура – грудково-плитчаста. Текстура – тонкошарова, плямиста.

Конкські глини зони сучасного інтенсивного вивітрювання характеризуються нерівномірним плямистим забарвленням: зелено-бурі і темно-сірі. Простежується крутоспадаюча тонкошаровість за забарвленням. Вміст глинистої фракції високий (більше 80%). Консистенція – напівтверда і тугопластична. Макроструктура – грудково-луската і грудково-плитчаста, тріщинувата. Текстура неправильно шарова, нешарова, плямиста. У породі зустрічаються гнізда

кристалічного гіпсу. Конкські глини зони ускладненого вивітрювання темно-сірі з зеленуватим відтінком. Будова нешарова і мікрошарова. У глині розвинута тріщинуватість без певної орієнтації. Консистенція – напівтверда. Макроструктура – грудково-луската і грудково-плитчаста.

В усіх зразках глин, що досліджувалися, вміст карбонатів склав не більше 5%, що дає підставу класифікувати караганські і конкські глини як безкарбонатні породи.

Мінералогічний склад тонкодисперсної караганських і конкських глин (частинки розміром менше 0,001 мм) встановлювали за даними термічного і хімічного методів. На рис. 2. наведені відповідні криві нагрівання. Як бачимо, караганські і конкські глини близькі за мінералогічним складом колоїдно-дисперсної фракції. Для зразків характерні три ізотермічні реакції. Перша езотермічна реакція має максимум у інтервалі 120-160<sup>0</sup>С і відповідає виділенню адсорбційної і міжпакетної води. Друга, з температурним максимумом 545-570<sup>0</sup>С, пов'язана з втратою гідроксильної групи кристалічної ґратки з подальшим її руйнуванням. Реакція ця менш інтенсивна, ніж перша, що є характерною ознакою наявності монтморилоніту. Третій екзотермічний ефект з максимумом при 800-850<sup>0</sup>С пов'язаний з повним руйнуванням кристалічної ґратки глинистих мінералів. Характерною для монтморилоніту є також екзотермічна реакція, яка відбувається безпосередньо за третьою і пов'язана з процесами перекристалізації аморфної речовини, що утворилася при руйнуванні кристалічної ґратки мінералів.

Езотермічні піки з температурами 290-460<sup>0</sup>С пов'язані з окисненням органічних речовин і марганцю.

Отримані криві порівнювалися з кривими еталонних мінералів. Деякі відхилення від стандартних кривих нагрівання мінералів групи монтморилоніту вказує на полімінеральний склад колоїдної-дисперсної фракції караганських і конкських глин.

Хімічний аналіз караганських і конкських глин проводили без виділення тонких фракцій. Результати експериментальних даних виявили мінеральний склад глинистої фракції караганських і конкських глин: у ньому переважає монтморилоніт, друге місце займають гідролуїди, потім ідуть каолініт і дисперсний кварц. За молекулярними відношеннями  $\frac{SiO_2}{Fe_2O_3}$  і  $\frac{Fe_2O_3}{MgO}$  встановлено, що породи змінені процесами витрування до глибини 23,0 м.

Гранулометричний склад глин визначався за методом піпетки у модифікації М.А. Качинського. Як пептизатор використовувався 10% розчину пірофосфату натрію. Караганські глини характерні найвищим вмістом фракції – менше 0,001 мм. Загальний вміст глинистих частинок (< 0,005 мм) для караганських і конкських глин однаковий (більше 80%). Конкські глини за вмістом частинок можна віднести до пилуватих, вміст тонкодисперсної фракції з розміром частинок менше 0,001 мм в них менший удвічі.

Обмінна ємність глин, що досліджуються, доволі висока – більше 30 мг-екв. на 100 г сухої породи. Це відповідає уяві про полімінеральний склад цих глин з переважанням монтморилоніту. Досліджувані глини, містять катіон натрію, який значно впливає на процес їх набрякання.

При оцінці властивостей глин важливою є гідрофільність, під якою розуміють спроможність поверхні дисперсної фази породи зв'язувати воду молекулярними силами. Деякі дослідники називають це явище активністю глин, а воду – зв'язаною. За фізичними властивостями зв'язана вода відрізняється від вільної. Наприклад, щільність зв'язаної води складає  $\rho_{wc} = 1,2-1,4$  г/см<sup>3</sup>, теплоємність – приблизно 0,7 кал./г град. Зв'язана вода замерзає за більш низьких температур (при -78<sup>0</sup>С у монтморилонітах [1,6]).

Процес переходу води від вільного стану до зв'язаного супроводжується виділенням тепла, яке зветься теплою змочування. Цей принцип покладено в основу методу оцінки вмісту зв'язаної води в породі – метод калометричних вимірів теплоти змочування на установках адіабатичного типу. Караганські глини за теплою змочування (5,32-6,95 кал./г) відносяться до середньогідрофільних порід. Їх тонкодисперсна фракція (10,48-14,41 кал./г) є високогідрофільною.

За складом обмінних катіонів глини відносяться до підкласу натрієво-магнієвих і натрієво-кальцієво-магнієвих порід. Глини з такими

властивостями при взаємодії з водою тривалий час набрякають.

На наш погляд, саме зв'язана вода розклинює рухливу (пакетну) кристалічну ґратку монтморилоніту, чи викликає явище набрякання монтморилонітових глин.

Наявність зв'язаної води слід враховувати при визначенні багатьох основних і похідних характеристик фізичних властивостей глинистих порід.

Так, наприклад, щільність частинок глини –

$$\rho'_s = \frac{\rho_s}{1 + (1 - \frac{1}{\rho_{ws}})W_c \rho_s} \quad (1)$$

Ступінь водонасичення глини –

$$S_{rc} = \frac{W - \left( \frac{\rho_{wc} - 1}{\rho_{wc}} \right) W_c}{e} \rho_s \quad (2)$$

Повна вологоємність глини –

$$W_c = \frac{e}{\rho_s} + \left( 1 - \frac{1}{\rho_{wc}} \right) W_c \quad (3)$$

де  $\rho_s$  – щільність частинок ґрунту без урахування властивостей зв'язаної води;

$\rho_{wc}$  – щільність зв'язаної води,  $\rho_{wc} = 1,3$  г/см<sup>3</sup>;

$W_c$  – вологість зв'язаної води;

$e$  – коефіцієнт пористості ґрунту.

Розрахунки за наведеними формулами свідчать, що похибка при обчисленні вказаних характеристик без урахування поправки на зв'язану воду складає 10-20%. При цьому найбільші похибки відносяться до гідрофільних глин.

Для дослідження деформацій набрякання неогенових глин в натурних умовах було побудовано дослідну ділянку трубопроводу в натуральну величину, схему якої наведено на рис. 3. Ділянка трубопроводу має довжину 370 м. У траншею глибиною 2,85 м укладено трубу 1840x10 мм без виконання зворотного засипання. Вага труби 4,46 кН/м.п. На трубі кожні 12 м за довжиною встановлені зварюванням поверхневі маркери з арматури діаметром 20 мм.

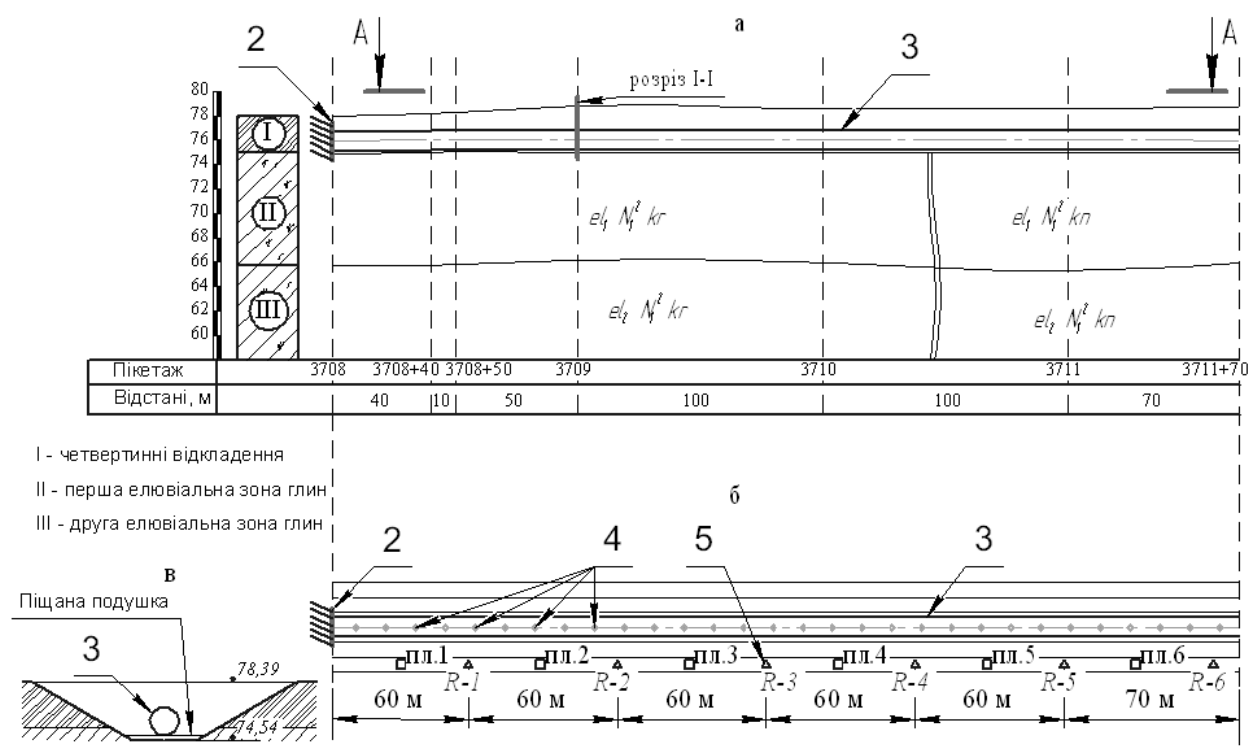
Спостереження проводилися з метою:

- визначення деформацій набрякання і процесу їх протікання у часі;

- порівняння результатів спостережень з розрахунками шляхом встановлення залежності "деформації набрякання – тиск набрякання" за результатами розв'язання пружно-пластичної задачі нелінійної механіки ґрунтів;

- визначення прогнозованої деформації набрякання основи трубопроводу в залежності від конструктивних його особливостей і різновидів ґрунтів, що набрякають.

Спостереження за вертикальними деформаціями труби велось методом геометричного нівелювання, як найбільш надійного за точністю і простого у його реалізації. В основу методики спостережень покладені розробки, викладені у [3,8,9]. Нівелювання велось за деформаційними марками і опорними точками зв'язку.



а – поздовжній розріз; б – план труби з розміщеними поверхневими марками; в – поперечний розріз; 2 – жорстке закріплення; 3 – труба; 4 – поверхневі марки; 5 – глибинні репери

Рисунок 3 – Схема дослідної ділянки трубопроводу

Розміщення деформаційних марок і опорних точок зв'язку є основною частиною всієї роботи з вимірюванням деформацій. Від вірного розміщення необхідної кількості марок значною мірою залежить якість, повнота і однозначність визначення деформацій. Марки розташовуються в усіх характерних точках трубопроводу. Відстань між ними залежить від інженерно-геологічних умов ділянки, конструкції фундаментів, величини деформацій, що очікуються, і їх нерівномірності. Для труби на основі, що набрякає, відстань між марками прийнято 12 м.

Для фіксування поверхневих марок, а також для проведення спостережень за деформуванням труби встановлено шість реперів (рис. 2). Репери встановлені за принципом глибинних марок. У свердловину глибиною 10 м встановлено колону газових труб, кінець якої у вибої свердловини був забетонований на 30 см. Потім у свердловину було встановлено і зацементовано обсадну колону. Щоб зафіксувати положення центральної труби (газової) за глибиною свердловини було встановлено дерев'яні шайби, а у гирлі свердловини встановлено саліньки, щоб запобігати водопроникненню [2, 3].

Обґрунтування точності і періодичності геодезичних вимірів впливає на вибір приладів та методики спостережень, а також забезпечує раціональність витрат на дослідження [10].

Частота і точність вимірів визначається із наступних умов:

- інтенсивності набрякання;

- величини, яка характеризує граничний стан висотного положення споруди.

У період будівництва набрякання основи прогресує, тому точність вимірів може бути невисокою, а частота вимірів більшою. У період експлуатації трубопроводу швидкість набрякання затухає, відповідно, вимоги до точності вимірів підвищуються, частота вимірів зменшується.

Величина похибки нівелірного ходу визначається за формулою

$$f_n = \sqrt{n} \quad (4)$$

де  $n$  – число станцій у ході.

Перевищення на станціях обчислюють з округленням до 0,5 мм. Перед обчисленням позначок марок проводили вирівнювання нівелірного ходу. Перед початком нівелювання розраховували необхідну точність спостережень за набряканням, застосовуючи підхід, розроблений у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка (ПолтНТУ). При цьому виходили з вимог про те, що збільшена удвічі квадратична похибка визначення набрякання не повинна перевищувати їх найменшу абсолютну величину, що забезпечує отримання даних про набрякання та їх нерівномірності з довірчою імовірністю 0,95. У загальному вигляді

$$m_n = S_{\min} / t\sqrt{2} \quad (5)$$

$$m_n = \Delta_{\min} / 2t \quad (6)$$



Рисунок 4 – Графіки максимальних деформацій поверхневих марок для глин

де  $m_n$  – середня квадратична похибка визначення позначок поверхневих марок;

$S_{\min} i \Delta_{msn}$  – найменші величини відповідно набрякання та їх нерівномірностей, які необхідно фіксувати в результаті спостережень;

$t$  – нормувальний множник, який використовується при переході до середньої квадратичної похибки.

Швидкість набрякання основи трубопроводу визначають за формулою

$$v = S / T, \quad (7)$$

де  $S$  – середнє набрякання основи трубопроводу за період часу  $T$ .

Середня квадратична похибка визначення швидкості набрякання

$$m_v = m_s / T. \quad (8)$$

Коли прирівняти  $v_{\min} = t \cdot m_v$ , то з урахуванням, що  $m_s = m_n \cdot \sqrt{2}$ , отримаємо:

$$m_v = T / t \sqrt{2}. \quad (9)$$

Таким чином, для отримання із заданою імовірністю даних про швидкість набрякання основи трубопроводу необхідно, щоб середня квадратична похибка позначок марок осідання не перевищувала  $T / t \cdot \sqrt{2}$  мінімальної величини цієї швидкості.

При відомому значенні  $m_n$  залежно від необхідної імовірності отримання даних обирають методику геодезичних спостережень, яка забезпечує необхідну їх точність.

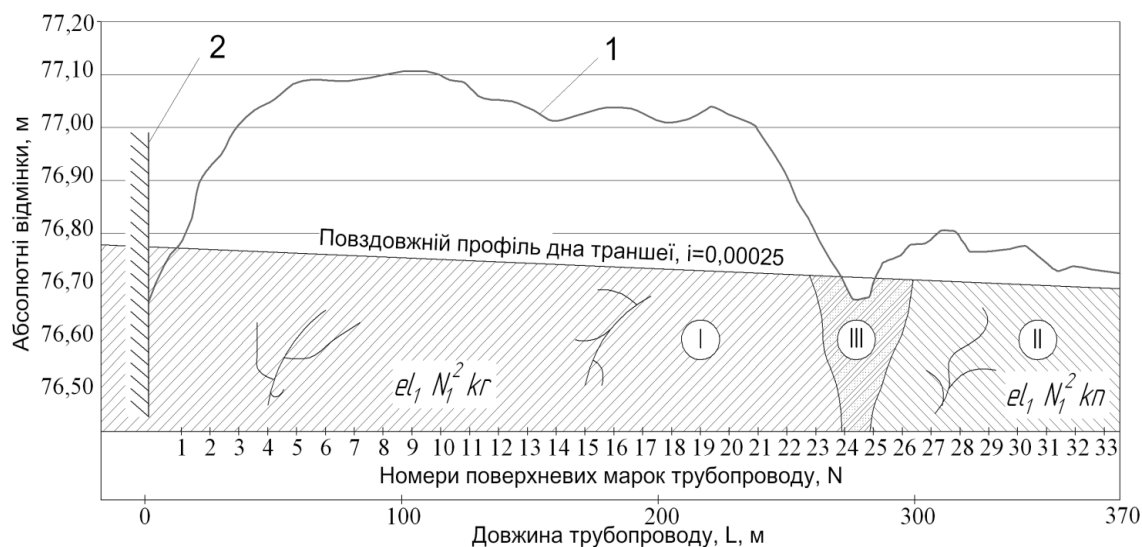
Спостереження продовжувалися безперервно протягом 22 місяців. За цей період відбувалося періодичне атмосферне зволоження ґрунтів основи трубопроводу. У такі періоди траншея наповнювалася водою, внаслідок чого ґрунти набрякали. Зволоження було інтенсивним, оскільки траншея стояла відкритою і накопичувала воду. У літній період, коли вода висихала, спостерігалися деформації осідання основи.

На рис. 4 наведено криві максимальних і мінімальних деформацій для кожної поверхневої марки. Крива 1 відповідає максимальному підйому трубопроводу від набрякання основи на ділянці розповсюдження караганських глин. Відповідна динаміка для конкських глин характеризується кривою 2.

Загальний вигляд кривої максимального набрякання за усією довжиною дослідної ділянки трубопроводу наведено на рис. 5.

Як видно з графіків, деформації труби не однакові за довжиною трубопроводу. Це явище пояснюється, по-перше, тим, що по його трасі залягають різні неогенові глини. На ділянці I залягають караганські глини, а на ділянці II – конкські глини. За період спостережень максимальне набрякання для караганських глин склало 370 мм, а конкських – 105 мм. При висиханні основи усадка склала для караганських глин – 100 мм, а конкських – 25 мм. По-друге, у місці розташування поверхневої марки М-1 збудовано масивну кутову опору з тиском на ґрунт  $p = 200$  кПа, що призвело до осідання основи при зволоженні. На наш погляд, осідання опори виникло за рахунок видавлювання з-під подошви опори водонасиченого ґрунту, який набрякав. По-третє, у місці розташування поверхневих марок М-23...М-26 виявлено осідання трубопроводу до 4,0 см. Це явище пояснюється тим, що в ході проведення земляних робіт з підготовки основи для труби утворилася невелика балка шириною близько 30 м з майже не ущільненим ґрунтом. Тобто зафіксовано брак у виконанні земляних робіт.

Щоб визначити природну вологість ґрунтів, перед укладанням труби в траншею були пробурені свердловини, з яких починаючи з позначки дна траншеї через кожні 0,25 м було відібрано зразки ґрунту. Такі ж свердловини пробурено, щоб оцінити вологість ґрунтів після тривалого зволоження атмосферними водами. Результати експерименту відображено на рис. 6.



1 - крива деформацій; 2 – жорстке закріплення;  
I – караганські глини; II – конкські глини; III – неущільнений насипний ґрунт

**Рисунок 5 – Крива розподілу деформацій набрякання**

В усіх свердловинах спостерігалось підвищення вологості до певної глибини. Вважаємо, що збільшення вологості після дослідів свідчить, що відбулося набрякання ґрунту. Вивчаючи вологість ґрунту за глибиною основи, можливо встановити глибину, де вологість залишається незмінною [12,13].

Як свідчать результати проведених досліджень, збільшення вологості ґрунтів за глибиною відмічено лише в зонах інтенсивного вивітрювання основи. Для караганських глин ця глибина склала 8,2 м, а для конкських – 6,4 м. Ці глибини можливо прийняти за товщу ґрунтів, які набрякають.

Для встановлення залежності між нормальним тиском і деформаціями набрякання ґрунтів дослідного майданчика були проведені лабораторні дослідження глин. Для відбирання зразків ґрунту на ділянці трубопроводу були пройдені два шурфи у караганських і конкських глинах.

При випробуванні зразків ґрунтів, що набрякають, в лабораторних умовах використовують такі методики:

- однієї кривої;
- двох кривих;
- зворотної кривої.

На рис. 7 наведено розрахункові схеми до перелічених методик.

За методом однієї кривої (рис. 7,а) зразок ґрунту встановлюється в одометр. На ґрунт передається вертикальний тиск, що створює компресію на ґрунт. Після стабілізації осідання при заданому тиску на ґрунт  $\sigma$ , зразок ґрунту зволожується, і спостереження ведуться до повного затухання деформації набухання.

За методом двох кривих (рис. 7,б) випробують два зразки ґрунту. Один зразок в одометрі зволожується без навантаження – проходить вільне набрякання ґрунту. Після стабілізації деформації вільного набрякання на зразок ступенями передають вертикальний тиск, тобто

проводиться компресія ґрунту, який перед цим набряк. Другий зразок ґрунту піддають компресійному стисненню при природній вологості.

За методом зворотної кривої (рис. 7,в) зразок ґрунту встановлюють в одометр і навантажують ступенями вертикальним тиском  $\sigma$ . Після стабілізації деформації стиснення зразок зволожується, і починається його набрякання. Зразок розвантажується ступенями і при  $\sigma = 0$  відбувається повна стабілізація деформації набрякання.

Метод однієї кривої найбільш точно відповідає роботі ґрунту в основі трубопроводу тому, що ґрунт, який досліджується, при цьому проходить дві фази деформування: ущільнення під дією навантаження від споруди і набрякання при зволоженні ґрунту в процесі експлуатації трубопроводу.

Відносне набрякання ґрунту  $\epsilon_{sw}$  обчислюють за формулами [11]:

- при інфільтрації вологи

$$\epsilon_{sw} = (h_{sat} - h_n) / h_n, \quad (10)$$

де  $h_n$  – висота зразку природної вологості та щільності, обтиснутого без можливості бокового розширення тиском  $p$ , що дорівнює сумарному вертикальному напруженню  $\sigma_{z,tot}$  на глибині, яка розглядається;

$h_{sat}$  – висота того ж зразку після замочування до повного водонасичення, обтиснутого в таких же умовах;

$h_0$  – початкова висота зразка ґрунту;

- при екрануванні поверхні та зміні воднотеплового режиму

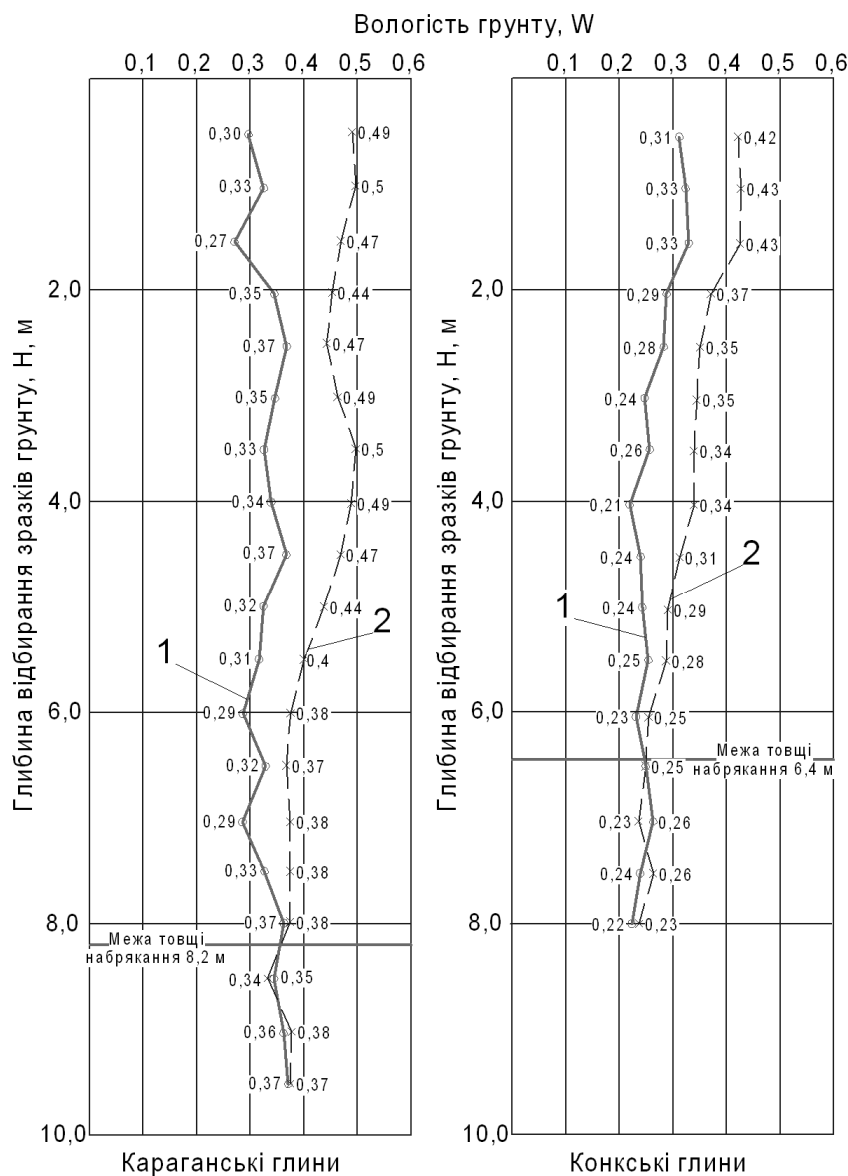
$$\epsilon_{sw} = k (w_{eq} - w_0) / (1 + e_0), \quad (11)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який визначають шляхом випробувань (за відсутності даних випробувань приймається  $k = 2$ );

$w_{eq}$  – кінцева (усталена) вологість ґрунту;

$w_0$  і  $e_0$  – відповідно початкове значення вологості і коефіцієнта пористості ґрунту.





1 – природна вологість; 2 – вологість водонасиченого ґрунту

Рисунок 6 – Графіки розподілу вологості за глибиною основи трубопроводу

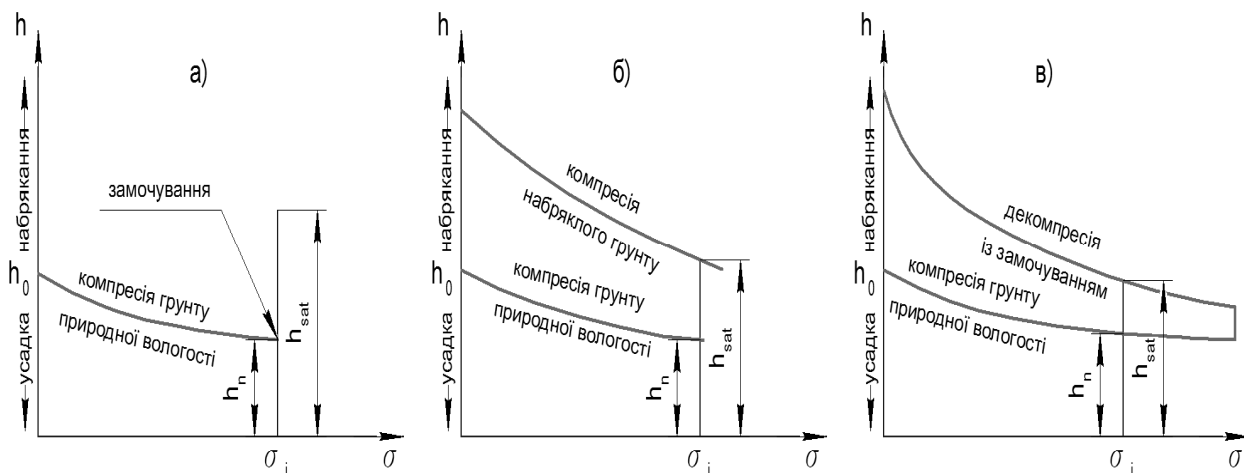


Рисунок 7 – Розрахункові схеми при визначенні відносного набрякання ґрунту за методиками однієї кривої (а); двох кривих (б); зворотної кривої (в)

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики караганських глин

№№ з/п	Нормальний тиск на ґрунт, $\sigma$ , кПа	Вологість після набрякання, $W$	Щільність скелету після набрякання $\rho_d$ , т/м <sup>3</sup>	Значення одноосного набрякання, $\epsilon_{sw}$ , %	Питомий опір penetрації $R$ , кПа
1	0	0,61	1,025	34,5	20
2	25	0,485	1,18	8,9	95
3	50	0,47	1,19	4,8	120
4	75	0,443	1,20	3,4	160
5	100	0,42	1,21	2,4	200
6	125	0,425	1,22	2,0	260
7	150	0,42	1,225	1,4	240
8	175	0,425	1,225	1,4	270

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики конкських глин

№№ з/п	Нормальний тиск на ґрунт, $\sigma$ , кПа	Вологість після набрякання, $W$	Щільність скелету після набрякання $\rho_d$ , т/м <sup>3</sup>	Значення одноосного набрякання, $\epsilon_{sw}$ , %	Питомий опір penetрації $R$ , кПа
1	0	0,62	0,99	13,8	26
2	25	0,51	1,11	5,0	160
3	50	0,46,4	1,18	2,8	192
4	75	0,44,9	1,21	1,43	212
5	100	0,44,7	1,21	1,09	224
6	125	0,43,2	1,22	0,21	228
7	150	0,43,6	1,21	0,27	238
8	175	0,43,6	1,21	0,1	222
9	200	0,44,1	1,20	0,3	240
10	225	0,43,5	1,21	0,1	256
11	250	0,43,2	1,21	0,17	260
12	68	0,45,5	1,20	1,9	210

За даними професора Є.А. Сорочан [5] розбіжність, яку отримують при визначенні  $\epsilon_{sw}$  за вказаними методиками, пояснюється різними умовами, в яких проходить процес набрякання основи конкретної споруди. На це, наприклад, суттєво впливають умови зволоження ґрунтів, які набрякають.

Дослідження процесів стиснення і набрякання ґрунтів проводили на приладі КПП-1 – одометрі конструкції Угліцького заводу. Зразки ґрунту, відібрані поблизу кільця площею 40 см<sup>2</sup> і висотою 3,5 см, встановлювали в одометр і проводили компресійні випробовування за вертикальних тисків  $\sigma = 0,025-0,25$  МПа. За умовну стабілізацію деформації стиснення прийнято приріст набрякання у 0,01 мм за дві години спостережень. Після виконання умови стабілізації стиснення у прилад наливали воду. За умовну стабілізацію деформації набрякання прийнято приріст набрякання у 0,01 мм за три доби. Вільне набрякання зразків ґрунту визначали на приладах ПНГ за стандартною методикою.

Після завершення набрякання зразка глини проводили penetраційні його випробовування за допомогою лабораторного пенетрометра

ЛП-1, оснащеного конічним наконечником з кутом розкриття 30°. Визначали питомий опір penetрації,  $R$ , який є комплексною характеристикою механічних властивостей ґрунту.

Для відробленого ґрунту визначали вологість  $W$  і щільність скелету  $\rho_d$ . Усі визначення зведені до таблиці: для караганських глин – табл. 1; для конкських глин – табл. 2.

Відповідно до даних лабораторних досліджень встановлено:

для караганських глин: тиск набухання –  $\sigma_{sw} = 0,325$  МПа; вільне одноосне набрякання  $\epsilon_{sw} = 34,5\%$ .

для конкських глин: тиск набухання –  $\sigma_{sw} = 0,125$  МПа; вільне одноосне набрякання  $\epsilon_{sw} = 13,8\%$ .

Зі збільшенням вертикального тиску на ґрунт  $\sigma$ , вологість набрякання зменшується, а починаючи з  $\sigma = 0,075$  МПа залишається практично постійною.

Встановлені залежності між деформацією і тиском набрякання для караганських і конкських глин використані для розрахунку величини підйому металевому трубопроводу

Багаторічний досвід експлуатації трубопроводів великого діаметру свідчить, що вони

підлягають частим руйнуванням. Це пояснюється особливістю умов їх роботи, які обумовлюються деформаціями земної поверхні, а також недостатнім вивченням умов роботи в особливих ґрунтових умовах (слабких, тих що просідають чи набрякають тощо).

Переміщення ґрунтів повинні враховуватися при проектуванні трубопроводів, які чутливі навіть до невеликих деформацій земної поверхні, тому що контактують з ґрунтом усією своєю поверхнею і сприймають усі його деформації. Тому головним завданням розрахунку трубопроводу є прогнозування його деформацій у процесі експлуатації. Цей прогноз з урахуванням норм України для ґрунтів, що набрякають, виконується у такій послідовності [4].

1. Збирання навантажень, до яких входять власна вага трубопроводу, тиск ґрунту на трубу; складання епюри тиску у ґрунті за глибиною з урахуванням ваги трубопроводу і зворотного засипання.

2. Визначення вірогідного значення підйому основи трубопроводу при набряканні ґрунтів  $h_{sw}$  за формулою

$$h_{sw} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sw,i} h_i k_{sw,i} \quad (12)$$

де  $\varepsilon_{sw}$  – відносне набрякання ґрунту  $i$ -го шару;  
 $h_i$  – товщина  $i$ -го шару ґрунту;

$k_{sw,i}$  – коефіцієнт, що залежить від сумарного вертикального напруження  $z_{tot}$  на глибині, проведення досліджень, приймають рівним: 0,8 – при  $\sigma_{z,tot} = 50$  кПа, 0,6 – при  $\sigma_{z,tot} = 300$  кПа, інтерполяцією – при проміжних значеннях  $\sigma_{z,tot}$ .

За даними проведених розрахунків висота підйому основи при набряканні ґрунту складає:

– для трубопроводу, укладеного в траншею без зворотного засипання: в караганських глинах –  $h_{sw} = 318,2$  мм; в конкських глинах  $h_{sw} = 112,7$  мм;

– для трубопроводу, укладеного в траншею зі зворотним засипанням: в караганських глинах –  $h_{sw} = 152,4$  мм; в конкських глинах  $h_{sw} = 58,6$  мм.

Як свідчать наведені дані, результати натурних спостережень і розрахунків добре корелюються, що свідчить про достовірність лабораторних досліджень і надійність прийнятої методики прогнозування деформацій основи, що набрякає.

За результатами зіставлень з урахуванням даних розрахунків можливо прогнозувати максимальну величину підняття трубопроводу, який виконаний за проектом, внаслідок набрякання основи на ділянці розповсюдження караганських глин  $h_{sw} = 20,0$  см, а на конкських глинах –  $h_{sw} = 8,0$  см.

При цьому слід враховувати, що вздовж траси трубопроводу влаштовуються різні технологічні споруди (важкі опори в межах зміни напрямку трубопроводу, компресорні станції тощо), а також можливі порушення природного складу ґрунтів у процесі будівництва трубопроводу, які змінюють прогнозовані характеристики деформування основи і тим самим ви-

кликають нерівномірність деформацій. Все це може призвести до концентрації тиску набрякання на трубу і, відповідно, великих додаткових навантажень на конструкцію трубопроводу.

**Висновки.** На дослідній ділянці магістрального трубопроводу проведено польові і лабораторні дослідження властивостей набрякання караганських і конкських неогенових глин. Польові дослідження полягали у виготовленні ділянки металевого трубопроводу довжиною 370 м без зворотного засипання ґрунтом і тривалому спостереженні за його деформуванням внаслідок зволоження основи атмосферними водами.

Встановлено, що караганські і конкські глини є утворенням платформ морського басейну. Накопичення їх проходило в умовах трансрегресії моря, яке почалося у середньому міоцені внаслідок тектонічного опускання території Криму.

З використанням геологічного і експериментального методів досліджень було встановлено фактори, які впливають на процес набрякання глин:

– протягом четвертинного періоду розвивалися процеси вивітрювання глин, що призвело до утворення тріщинуватості у верхніх шарах ґрунту. За різними даними ця товща складає до 23 м;

– згідно з даними термічного і хімічного аналізів глиниста фракція характеризується високим вмістом монтморилоніту, який має рухливу ґратку, що розширюється при зволоженні. Вміст глинистих частинок сягає 85%;

– караганські глини характерні високим вмістом тонкодисперсної фракції (менше 0,001 мм), у конкських глинах її удвічі менше;

– за складом обмінних катіонів присутні натрієво-магнієві і натрієві-кальцієві-магнієві глини, які при взаємодії з водою набрякають тривалий час;

– караганські глини за теплою зволоження відносяться до середньогідрофільних порід, а їх тонкодисперсна фракція є високогідрофільною;

– вміст зв'язаної води у глинах є мірою оцінки їх гідрофільності, наявність її слід враховувати при обчисленні характеристик фізичних властивостей глин.

Внаслідок проведених натурних досліджень встановлено максимальне значення висоти підйому трубопроводу в караганських і конкських глинах. Отримані результати близькі до тих, що були розраховані за нормативною методикою з використанням даних лабораторних досліджень.

Встановлено також, що караганські глини значно більше набрякають, ніж конкські. Також доведено, що за відсутності зворотного засипання деформація набрякання внаслідок атмосферного зволоження ґрунтів удвічі більша, ніж за її наявності.

При складанні розрахункових схем в процесі проектуванні конструкцій трубопроводів, які влаштовуються у районах розповсюдження

грунтів, що набрякають, слід враховувати можливі нерівномірності деформацій за довжиною труби, які при певних умовах можуть призвести до концентрації значних тисків на трубу.

### **Література**

1 Мяч И.В. Результаты лабораторных испытаний набухающих грунтов АР Крым / И.В. Мяч // *Научный вестник строительства*. – 2006. – Вып. 37. – С. 177-179.

2 Руководство по лабораторному изучению набухания и усадки глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1980. – 21 с.

3 Сорочан Е.А. Строительство сооружений на набухающих грунтах / Е.А. Сорочан. – М.: Стройиздат, 1989. – 309 с.

4 Костяной М.Г. Химико-минералогический состав и гидрофильные свойства сарматских, караганских и верхнемайкопских глин Керченского полуострова. // М.Г. Костяной, А.П. Дринь. – К.: АН УССР, Институт геологических наук, 1970. – 128 с.

5 Сорочан Е.А. Вопросы проектирования и строительства на набухающих грунтах / Е.А. Сорочан // *Строительство на набухающих грунтах*. – 1967. – С. 6-14.

6 Храпатова И.В. Урахування набухання ґрунтової основи на НДС системі «основа-фундамент-споруда» в умовах плоскої деформації / І.В. Храпатова // *Научный вестник строительства*. – 2007. – Вып.40. – С. 25-30.

7 Чунихин В.Г. Инженерно-геологические особенности набухания третичных глин Керченского полуострова в связи с условиями их формирования / В.Г. Чунихин // *Строительство на набухающих грунтах*. Материалы Всесоюзного совещания. – 1967. – С. 78-82.

8 Брайт П.И. Геодезические методы измерения деформаций оснований и сооружений. – М.: Недра, 1965. – 298 с.

9 Рекомендации по прогнозу осадок оснований сооружений по краткосрочным измерениям. – Владивосток: Госстрой СССР, ДальНИИС, 1986. – 22 с.

10 Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1975. – 156 с.

11 ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.

12 Hussein A.V. Soil Mechanics and Foundation / A.V. Hussein // *Elzaim elazhari univ (part one Khartoum, Sudan)*. – 2002. – 253 с.

13 Ашрам Махмуд Нихад. Давление набухания в зависимости от физических свойств пылевато-глинистых грунтов / М.Н. Ашрам // XXX научно-техническая конференция преподавателей, сотрудников, аспирантов ХГАКХ. Тезисы докладов. – Харьков, 2000. – С.21-22.

14 Мустафаев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах / А.А. Мустафаев. – М.: Высшая школа, 1989. – 590 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
07.09.12  
Рекомендована до друку професором  
Д.Ф. Тимківим*