

УДК 622.692.4

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ НА ОСНОВІ, ЗДАТНОЇ ДО НАБРЯКАННЯ**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДА НА НАБУХАЮЩЕМ ОСНОВАНИИ**

## **SIMULATION OF PIPELINE ON SWELLING SOIL**

**Харченко М.О., к.т.н., Зімін О.Л., аспірант** (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

**Харченко М.А., к.т.н., Зимин О.Л., аспирант** (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава)

**Kharchenko M.O., candidate of technical sciences, Zimin O.L., post-graduate student** (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava)

**Наведено результати чисельного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводу на основі, здатній до набрякання.**

**Приведены результаты численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода на набухающем основании.**

**It is presented the results of numerical simulate on by finite elements method of stress-deformed state of pipeline on swelling soil.**

### **Ключові слова:**

Трубопровід, набрякливий ґрунт, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

Трубопровод, набухающий ґрунт, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

Pipeline, swelling soil, finite elementsmethod, stress-deformed state.

**Вступ.** На території України ґрунти, що набрякають, розповсюджені доволі широко, особливо на півдні та сході країни. Трубопровід у процесі експлуатації при підземній схемі прокладки контактує всією поверхнею з основою і сприймає всі її деформації [1]. Це може призвести до надмірних деформацій [2] та значних напружень у конструкціях трубопроводу, що підвищує імовірність їх розриву [3]. При вигинах трубопроводу, більших за

його радіус, навантаження, що діють на цю конструкцію, перерозподіляються залежно від деформації трубопроводу, яка сама по собі є невідомою [4]. Це зумовлює невирішеність задачі в лінійній постановці, особливо аналітичними методами. Тому виникає необхідність у чисельному моделюванні МСЕ трубопроводу та ґрунту, в якому він прокладений.

**Аналіз останніх досліджень.** Існує ряд вчених, які аналітичними та чисельними методами розв'язують задачі НДС трубопроводів, в тому числі і в складних інженерно-геологічних умовах [2 – 8]. Дослідження особливостей ґрунтів, що здатні до набрякання, наведені в роботах [2, 9, 10].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.** Сьогодні існує достатня кількість програмних комплексів (ПК), які можуть змоделювати НДС як трубопроводу, так і ґрунту, в якому він прокладений. При цьому методика чисельного моделювання роботи трубопроводів на ґрунтах, що здатні до набрякання, відсутня.

Тому за мету роботи прийнято МСЕ виконати розрахунок ділянки трубопроводу на ґрунтах, що здатні до набрякання.

**Виклад матеріалів досліджень.** Спеціалістами ПолтНТУ на дослідній ділянці магістрального трубопроводу довжиною 370 м (рис. 1), яка розташована на Керченському півострові Криму, проведено польові й лабораторні дослідження властивостей набрякання караганських і конкських неогенових глин [2]. Для цього у траншею глибиною 2,85 м укладено трубу діаметром 1840 мм з товщиною стінки 10 мм. Момент опору перерізу труби складає  $W=0,02616 \text{ м}^3$ . Зворотнє засипання траншеї не виконувалося. Вага труби складала 4,46 кН/м.п. На трубі через 12 м за довжиною встановлені поверхневі марки з арматури діаметром 20 мм. Для фіксування поверхневих марок, а також для проведення спостережень за деформуванням труби встановлено шість реперів за принципом глибинних марок.

Особливість ґрунтів, здатних до набрякання, полягає в тому, що при зволоженні вони збільшуються в об'ємі. При цьому виникають деформації, протилежні за напрямком гравітаційним силам. Такі деформації основи шкодять спорудам більше, ніж переміщення, які пов'язані з осіданням основи. Тому польові дослідження [2] полягали у тривалому спостереженні за деформуванням трубопроводу унаслідок зволоження основи атмосферними водами. З цією метою виконували нівелювання поверхневих марок III класом точності за профілем трубопроводу.

Лабораторними дослідженнями визначено петрографічні особливості неогенових глин, а також характеристики набрякання [11]. Згідно з цими дослідженнями встановлено: 1) для караганських глин: тиск набухання  $\sigma_{sw}=0,325 \text{ МПа}$ ; вільне одноосне набрякання  $\epsilon_{sw}=34,5\%$ ; 2) для конкських глин: тиск набухання  $\sigma_{sw}=0,125 \text{ МПа}$ ; вільне одноосне набрякання  $\epsilon_{sw}=13,8\%$ .

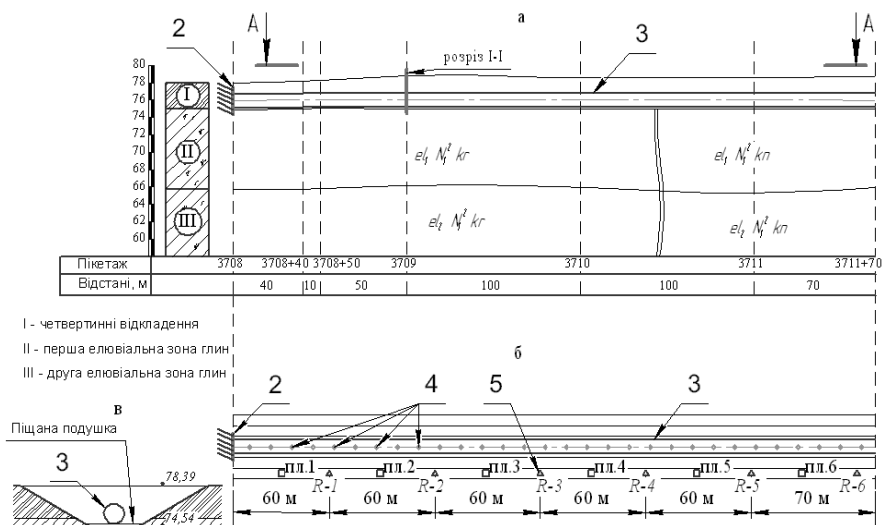


Рис. 1. Схема дослідної ділянки трубопроводу: а – поздовжній розріз; б – план труби з розміщенням поверхневих марок А-А; в – поперечний розріз І-І; 2 – жорстке закріплення; 3 – труба; 4 – поверхневі марки; 5 – глибинні репери

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

Загальний вигляд кривої максимального набрякання за усією довжиною дослідної ділянки трубопроводу наведено на рисунку 2.

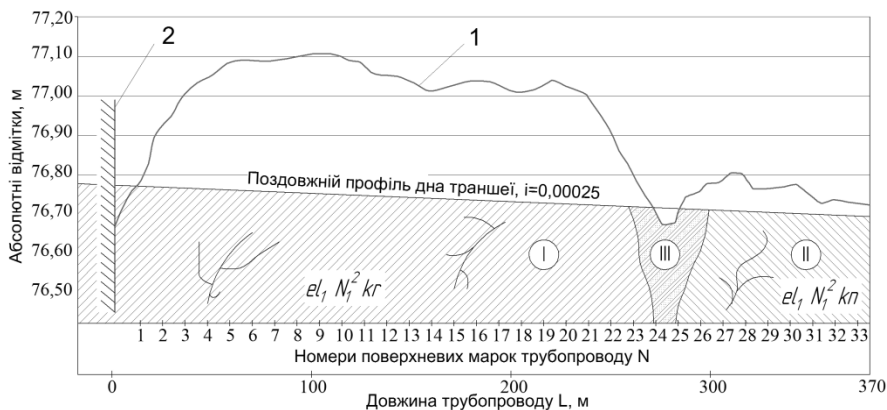


Рис. 2. Крива розподілу деформацій набрякання: 1 – крива деформацій; 2 – жорстке закріплення; I – караганські глини; II – конкські глини; III – неуцільнений насипний ґрунт

Результати досліджень підйому трубопроводу по довжині від набрякання ґрунту стали вихідними даними для чисельного моделювання.

Для розв'язання поставленої задачі розроблено чисельну модель трубопроводу на основі, здатній до набрякання, яка являє собою балку на пружній основі з вимушеними переміщеннями вузлів від набрякання ґрунту.

З цією метою використано ПК Ліра (версія 9.6). При використанні моделі балки на пружній основі 3D трубопровідна конструкція моделюється SE у вигляді балок кільцевого перерізу з відповідною жорсткістю (рис. 3, а і б). Ці елементи визначаються положенням своїх вузлів у тривимірному просторі й мають 6 ступенів свободи у вузлах – переміщення і кути повороту відносно осей декартової системи координат.

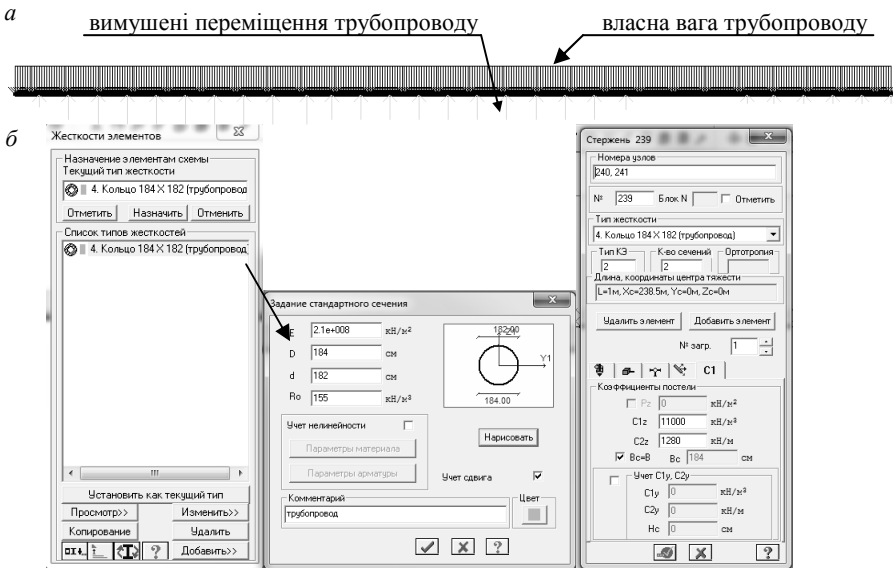


Рис. 3. Розрахункова схема балки на пружній основі з вимушеними переміщеннями вузлів від набрякання ґрунту (а) і жорсткість її елементів (б)

Трубопровідна конструкція змодельована стандартним кільцевим перерізом з відповідним модулем пружності  $E$ , внутрішнім  $d$  і зовнішнім  $D$  діаметрами, питомою вагою матеріалу  $R_0$ . Опір ґрунту на підземних ділянках трубопроводу змодельований за допомогою двох коефіцієнтів постелі  $C1_z$  (коефіцієнт стиснення) і  $C2_z$  (коефіцієнт звуку) (рис. 3, б). Параметри коефіцієнтів постелі  $C1_z$  і  $C2_z$  визначалися відповідно до інженерно-геологічних умов дослідного майданчика і конструкції трубопроводу.

В'язі розрахункової моделі відповідають натурним умовам – жорстке закріплення вузла 1 (початок трубопроводу), інші вузли моделювали пружну властивість ґрунтової основи.

Навантаження на трубопровід – його власна вага та підйом основи від набрякання ґрунту (рис. 3, а).

У конкретному випадку змінністю модуля деформації ґрунту основи трубопроводу по його довжині знехтували, оскільки цей фактор найменше впливає на зусилля, які в ньому виникають у разі набухання ґрунту.

Визначення коефіцієнтів постелі для даної задачі виконується за схемою лінійно-деформованого на півпростору з усередненими характеристиками багатощарової основи – модулем деформації  $E$  і коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ . Методика розрахунку  $C1_z$  і  $C2_z$  наведена нижче (як для стрічкового фундаменту з шириною  $b=\pi D/5=1,0$  м):

$$C1_z = E / (H_c \cdot (1 - \nu^2)) \quad (1)$$

$$C2_z = E \cdot H_c / (6 \cdot (1 + \nu^2)) \quad (2)$$

де  $E$  – модуль деформації основи;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона основи;  $H_c$  – глибина товщі, що стискається.

Напруження в основі від власної ваги ґрунту і ваги трубопроводу наведені на рисунку 4. При цьому стиснута товща визначена за рекомендаціями [11] і в даному випадку складає  $H_c=1,0$  м. Згідно з інженерно-геологічним розрізом (рис. 1) вся стиснута зона знаходиться на одній ділянці в караганських глинах, на іншій – в конкських глинах. Модуль деформації і коефіцієнт Пуассона даних ґрунтів однакові, і складають  $E=10$  МПа,  $\nu=0,3$  відповідно.

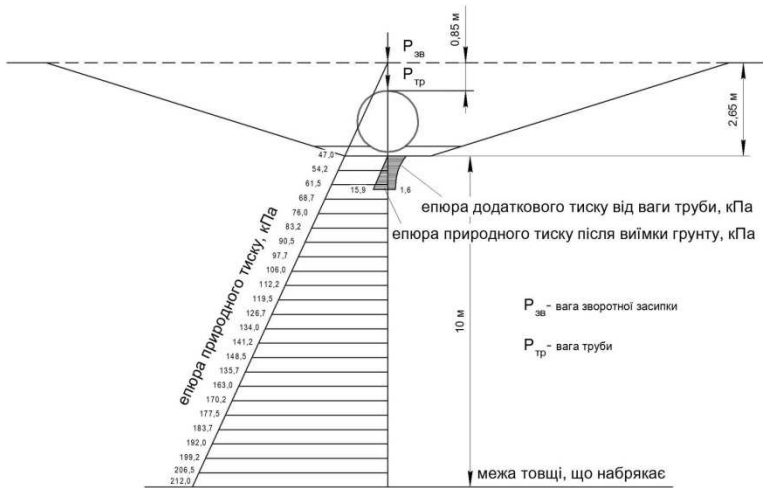


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення напружень в основі трубопроводу і стиснутої товщі

При розрахунках за формулою (1) отримано  $CI_z=11000 \text{ кН/м}^3$ ,  $Cz_2=1280 \text{ кН/м}$ .

Чисельне моделювання виконано поетапно.

Етап 1 – трубопровідна конструкція отримує вертикальні деформації осідання основи від власної ваги (вологість ґрунту у природному стані) – стадія монтажу.

Етап 2 – трубопровідна конструкція вигинається від набухання ґрунту (ґрунт замочений) – стадія експлуатації.

Результати чисельного моделювання НДС трубопроводу МСЕ першого етапу наведені на рисунку 5. При цьому максимальні зусилля по довжині трубопроводу наступні: згинальний момент –  $M_{\max}=12,47 \text{ кНм}$  ( $M_{\min}= - 62,36 \text{ кНм}$ ), поперечна сила –  $Q_{\max}=23 \text{ кН}$ . Максимальне осідання основи трубопроводу по довжині склало  $S=0,23 \text{ мм}$ .

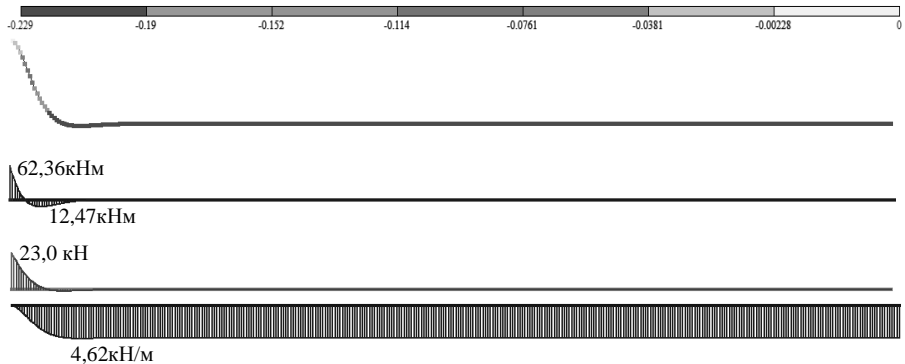


Рис. 5. Результати чисельного моделювання трубопроводу на пружній основ (перший етап – вологість ґрунту у природному стані): *а* – мозаїка переміщень; *б* – епюра згинальних моментів; *в* – епюра поперечних сил; *г* – епюра опору ґрунту

Результати чисельного моделювання НДС трубопроводу МСЕ другого етапу наведені на рисунку 6. При цьому мозаїка переміщень трубопроводу (рис. 6, *а*) прийнята за результатами геодезичних спостережень. Епюри згинальних моментів (рис. 6, *б*) і поперечних сил (рис. 6, *в*) побудовані для даних вихідних умов. Максимальні зусилля по довжині трубопроводу отримані на його початку (жорстке затиснення) і складають: згинальний момент –  $M_{\max}=3,1 \cdot 10^3 \text{ кНм}$ , поперечна сила –  $Q_{\max}=0,9 \cdot 10^3 \text{ кН}$ .

Значні внутрішні зусилля трубопроводу також спостерігається на переході від караганських до конкських глин –  $M=1,64 \cdot 10^3 \text{ кНм}$ ,  $Q_{\max}=0,51 \cdot 10^3 \text{ кН}$ . Це пояснюється тим, що на цій ділянці ґрунт має різні властивості набрякання і спостерігається різна величина підйому трубопроводу.

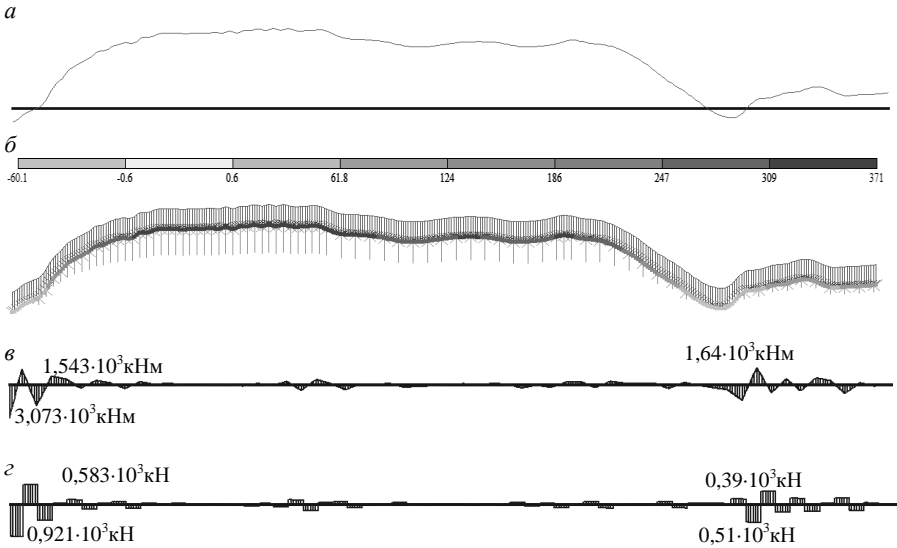


Рис. 6. Результати чисельного моделювання трубопроводу на пружній основі з вимушеними переміщеннями вузлів від набрякання ґрунту (другий етап – ґрунт замочений): *а* – деформована схема (умовно збільшено в 100 разів); *б* – мозаїка переміщень, в мм; *в*, *г* – епюри згинальних моментів і поперечних сил

Якщо трубопровід виготовлений зі сталі класу С255, то максимально допустимий згинальний момент, який витримає дана труба складе  $M_{\text{ч}}=6,278 \cdot 10^3$  кНм. Отже, при набуханні основи трубопроводу виникли зусилля, що складають 49% від гранично допустимого значення.

Як видно з першого і другого етапів моделювання внутрішні зусилля – максимальний згинальний момент при набуханні ґрунту зріс майже в 50 разів. Тому недооцінювати таку властивість основи неприпустимо.

**Висновки.** За допомогою чисельного моделювання МСЕ НДС трубопроводу на основі, здатній до набрякання, визначено внутрішні зусилля у трубі по її довжині. У результаті даних розрахунків отримано, що при набуханні основи трубопроводу в ньому виникли зусилля, що складають 49% від гранично допустимого значення. Тому для зменшення підйому трубопроводу від набухання ґрунту і зниження внутрішніх зусиль для його безпечної експлуатації в даних інженерно-геологічних умовах доцільно виконати привантажувачі і зворотне засипання пазух траншеї.

Для більш точного моделювання НДС трубопроводу доцільно розробити просторову скінченно-елементну розрахункову схему системи «трубопровід – основа, здатна до набрякання». Це дасть можливість отримати НДС як трубопроводу, так і основи. При цьому величина підйому від набухання ґрунту буде залежати від фактичних напружень у різних точках товщі, що здатна до набухання.

**1.** ДБН Д.2.2-25-99. Магістральні і промислові трубопроводи газо- та нафтопродуктів – К.: Держбуд України. – 2000. – 112 с. **2.** Онищенко, В.О. Деформації металевого трубопроводу в ґрунтах, що набрякають. / В.О. Онищенко, М.Л. Зоценко, Л.С. Шлапак, О.Л. Зімін // Матеріали міжнарод. наук.-техн. конф. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – С 253 – 255. **3.** Белов, Г.В. Моделирование развития аварийных процессов при разрыве подземного магистрального трубопровода / Г.В. Белов, В.С. Сафонов, С.А. Ковалев, С.В. Ганага // Инженерно-технический журнал «ANSYS. Advantage». Осень, 2008 (9). – С. 3 – 9. **4.** Шаммазов, А.М. Разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния газопроводов, проложенных в сложных инженерно-геологических условиях / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков, В.А. Чичелов // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 119 – 128. **5.** Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / Под ред. В.Е. Селезнева. Изд. 2-е, перераб. И доп. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с. **6.** Селезнев, В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с. **7.** Скворцов, Ю.В. Моделирование трубопроводных систем с помощью МКЭ–пакета «Ansys» / Ю.В. Скворцов. – Самара: Гипровостокнефть, 2000. – 84 с. **8.** Talebbeydokhti, N. Wave induced uplift forces acting on half-buried submarine pipeline in sandy seabed by numerical methods / N. Talebbeydokhti, E. Afzali // Iranian Journal of Science & Technology, Transaction, Engineering. – 2008. – V. 32, N. B2. – P. 141-151. **9.** Сорочан, Е.А. Строительство сооружений на набухающих грунтах / Е.А. Сорочан. – М.: Стройиздат, 1989. – 309 с. **10.** Мустафаев, А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах / А.А. Мустафаев. – М.: Высшая школа, 1989. – 590 с. **11.** ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Держбуд України. – 2009. – 104 с.