

УДК 528.48

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СВЕРДЛОВИН ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ

**І. Перович, Р. Олеськів**

Національний університет "Львівська політехніка"

**Ключові слова:** напружено-деформований стан; підземне сховище газу; свердловина.

### Постановка проблеми

Безпечна та надійна експлуатація підземних сховищ газу (ПСГ) передбачає проведення геодезичних спостережень за рухами земної поверхні та гирла свердловин, які розташовані на її території. Результати геодезичних вимірів дають змогу визначити напружено-деформований стан покрівлі підземних сховищ газу.

Інтерпретація результатів геодезичних вимірів, виконаних на топографічній поверхні, вглиб товщі покрівлі газового сховища, та визначення на цій основі напружено-деформованого стану свердловин є важливою та актуальною проблемою.

### Зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Запропонована публікація тісно пов'язана із Законом України "Про трубопровідний транспорт", Правилами створення та експлуатації підземних сховищ газу в пористих пластах, затверджених НАК "Нафтобаз України" від 31.08.1999 р., № 231, Правилами технічної експлуатації магістральних газопроводів, затверджених ДК "Укртрансгаз" від 20.09.2000 р. № 209. Ця розробка спрямована, передовсім, на розв'язання практичних задач, пов'язаних з визначенням деформаційних характеристик свердловин у процесі нагнітання і відбору газу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми.

Найширше питання рухів земної поверхні та гирла свердловин на основних підземних сховищах газу розглянуто в наукових працях та кандидатській дисертації І.Л. Перович [1]. Частково ці питання досліджував А.Л. Бондар на прикладі Шебелинського газового родовища [3]. Всі вищевказані наукові дослідження стосуються проблем вертикальних рухів земної поверхні та, частково, гирла свердловин і не торкаються питань впливу цих рухів на напружено-деформований стан технологічного обладнання і свердловин зокрема [2].

### Невирішені частини загальної проблеми

Визначення впливу вертикальних рухів покрівлі газосховища на напружено-деформований стан свердловин є досі невирішеною частиною загальної проблеми – безпечної та надійної експлуатації підземних сховищ газу.

### Постановка завдання проблеми

Розробити методикку визначення напружено-деформованого стану свердловин внаслідок верти-

кальних рухів покрівлі газосховища, викликаних процесами нагнітання і відбору газу в пласті-колекторі.

### Виклад основного матеріалу проблеми

Підземні сховища газу є складовою частиною загальної газотранспортної системи країни і забезпечують безперербійне подавання газу споживачам у разі виникнення непередбачуваних ситуацій, які утруднюють роботу основних систем транспорту газу. Як правило, штучні газові поклади формують у водоносному, виробленому у газовому та газоконденсатному або нафтовому пласті. Приблизно 80 % газу зберігають у вироблених газових та газоконденсатних пластах.

Принципова схема підземного сховища газу зображена на рис. 1.

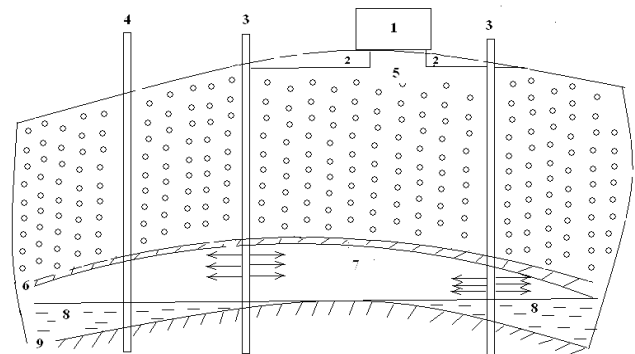


Рис. 1. Принципова схема підземного сховища газу:  
1 – компресорна станція; 2 – відповідні газопроводи;  
3 – експлуатаційні свердловини; 4 – контрольна свердловина; 5 – покрівля; 6 – верхній екран;  
7 – пласт-колектор; 8 – обводнена частина пласту;  
9 – нижній екран

На території ПСХ будують газокompресорну станцію, яка слугує для нагнітання та відбору газу із пласта-колектора 7 через експлуатаційні свердловини 3. Експлуатаційні свердловини безпосередньо зв'язані з газокompресором через відповідне технологічне обладнання і, зокрема, газопроводи – шлейфи 2.

Зауважимо, що, крім експлуатаційних свердловин, через які нагнітають і відбирають газ із пласта-колектора, на території ПСГ та поза його межами (контуром) облаштовують спостережні, контрольні та п'езометричні свердловини, основним призначенням яких є контроль за тиском у межах пласта-колектора та позаконтурній його частині, а також на горизонтах, розташованих вище від пласта-колектора.

Експлуатаційні свердловини облаштовують на 10–20 метрів нижче від пласта-колектора. Відповідно до

чинних правил всі колони цементують з підйомом цементного розчину до гирла свердловин, що забезпечує їх геометричність.

Залежно від потужності пласта-колектора, інженерно-геологічної будови та структури гірничих порід ПСГ об'єм активного газу в пласті-колекторі може досягати кількох млрд. м<sup>3</sup>, а перепади тисків при нагнітанні та відборі газу – 4...7 МПа. Зауважимо, що такі коливання тисків мають циклічний характер упродовж багатьох років, оскільки восени, як правило, нагнітають газ в пласт-колектор, а весною відбирають.

Оскільки перепади тисків мають циклічний характер, то за даними досліджень [5] циклічний характер мають вертикальні переміщення земної поверхні (покрівлі сховища), які фіксуються на фізичній поверхні землі ПСГ. Постає завдання знаходження напружено-деформованого стану труб свердловин на різних глибинах свердловини через величини вертикальних переміщень земної поверхні біля цих свердловин або гирла самих свердловин.

Аналіз проведених відомих наукових досліджень [5] показав, що за величиною та за знаком вертикальні переміщення земної поверхні та гирла свердловин однакові, а отже, можна вважати, що ці величини є кінцевим результатом деформації розтягу-стиснення труб свердловин внаслідок зміни тисків у пласті-колекторі.

Побудуємо теоретичну модель визначення деформації розтягу-стиснення труб свердловин на різних глибинах.

Розглянемо методику визначення напружено-деформованого стану труб для однієї зі свердловин. Зважаючи на те, що зі зменшенням глибини свердловини буде зменшуватись значення повздовжньої сили  $P$  та нормальних напруг  $\sigma$ , доцільно розбити стовбур свердловини на  $n$  ділянок, для яких можна вважати величини  $P$  і  $\sigma$  незмінними. В цьому випадку загальне вертикальне переміщення колони свердловини визначають як сумарне з переміщень в кожному перерізі. Тобто

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \dots + \Delta L_{n+1}, \quad (1)$$

де  $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_{n+1}$ , переміщення у першому, другому та останньому перерізах. Зауважимо, що знайдене таким способом значення  $\Delta L$  повинно дорівнювати його величині, визначеній для кожної свердловини на основі результатів геодезичних вимірів.

Величину переміщення на кожній частині труби можна визначити за формулою [6]:

$$\Delta L_i = \frac{N_i L_i}{EA_i}, \quad (2)$$

де  $A_i$  – площа перерізу труб свердловин;  $N_i$  – повздовжня сила в перерізах;  $L_i$  – довжина частини труби, для якої визначають переміщення;  $E$  – модуль пружності Юнга.

У наведеній формулі величини  $L_i$ ,  $E$  та  $A_i$  є постійними, змінною є тільки величина повздовжньої сили  $N_i$ . Знаючи значення величин  $N_i$  в кожному із перерізів, можна визначити та побудувати епюри нормальних напруг та порівняти їх з граничними

нормативними значеннями і встановити ступінь безпечної експлуатації свердловин. Значення напруг на кожній ділянці труби визначають за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{N_1}{A}; \sigma_2 = \frac{N_2}{A}; \sigma_3 = \frac{N_3}{A} \\ \sigma_4 &= \frac{N_4}{A}; \dots \sigma_{n+1} = \frac{N_{n+1}}{A}. \end{aligned} \quad (3)$$

За отриманими даними можна побудувати епюри напруг, що дасть змогу визначити напружено-деформований стан труб в кожній точці.

Прийнявши для сталевих труб при деформації розтягу – стиску та змінному пульсуючому навантаженні із симетричним циклом граничне напруження  $0,36 \sigma_B = [\sigma]$  ( $\sigma_B$  – довідкова границя міцності металу) за умови

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A} \leq [\sigma], \quad (4)$$

де  $[\sigma]$  – допустимі нормалі напруження, матимемо безпечну експлуатацію труб свердловин, в іншому випадку – критичну ситуацію. Для забезпечення безпечної експлуатації труб вводять коефіцієнт запасу  $k = 1,5 \dots 1,8$ . Тоді маємо

$$[\sigma] = \frac{0,36 \sigma_B}{k}. \quad (5)$$

Найважчим питанням у розв'язанні задачі є визначення величин повздовжньої сили на різних глибинних ділянках свердловини, а також величин цих ділянок, де величину  $N$  приймають незмінною.

Враховуючи, що свердловини цементуються в покрівлі сховища та зважаючи на результати геодезичних досліджень [5], які вказують, що переміщення гирла свердловин і земної поверхні за знаком і величиною є майже однаковими, приймемо вертикальні переміщення колони свердловини ідентичними переміщенню ґрунтової товщі покрівлі сховища на різних глибинах.

Основними факторами, які визначають довговічність експлуатації свердловин, є не тільки їх вертикальні переміщення, але й напруги, які виникають в них.

У теорії деформації ґрунтів встановлено, що у разі циклічних навантажень на ґрунт, тобто при його навантаженні і розвантаженні, проходить процес пружного ущільнення, який характеризується постійними величинами його пружних властивостей. Пружні деформації ґрунтів визначають методом загальних пружних деформацій, коли враховуються пружні переміщення не тільки для точок, які розташовані під навантаженою поверхнею, але й поза нею; місцевих пружних деформацій, коли враховуються тільки деформації безпосередньо в місці прикладання навантаження; загальні методи, які охоплюють як загальні пружні, так і місцеві непружні деформації.

Зважаючи на ту обставину, що будова геологічної структури покрівлі газосховища має складний характер, який можна подати в вигляді окремих елементарних шарів ґрунту певної товщини, де фізико-механічні властивості ґрунтів є однаковими, для визначення вертикальних переміщень ґрунтів слід

використати метод пошарового елементарного підсумування. У такому разі, враховуючи тільки осьові напруги для вертикального переміщення кінцевої точки поверхні АВС (рис. 2), маємо [4]:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^{i=h} h_i \frac{\beta_i}{E_{oi}} \sigma_{zi}, \quad (5)$$

де  $h_i$  – потужність (висота) окремих шарів ґрунту;  $\beta_i$  – коефіцієнт, який залежить від бокового розширення ґрунту (відповідно до БДН  $\beta_i = 0,8$  для всіх ґрунтів);  $E_{oi}$  – модуль загальної деформації ґрунту.

Точніше коефіцієнт бокового розширення  $\beta$  можна визначити за формулою:

$$\beta = 1 - \frac{2\mu_o^2}{1 - \mu_o}, \quad (6)$$

де  $\mu_o$  – коефіцієнт відносної поперечної деформації, який прийнятий: для глин і суглинків –  $\mu_o = 0,20 \div 0,25$ ; пластичних і плиннопластичних –  $\mu_o = 0,30 \div 0,40$ ; плинних –  $\mu_o = 0,45 \div 0,50$ ; для супісу –  $\mu_o = 0,20 \div 0,25$ .

Розраховане за цією методикою вертикальне переміщення контролюють його отриманим значенням за результатами геодезичних вимірювань. Для цього обчислюють різницю

$$v_S = \Delta S - \Delta S_G, \quad (7)$$

де  $\Delta S_G$  – вертикальне переміщення за результатами геодезичних вимірів.

Отримане відхилення  $v_S$  (нев'язку) розподіляють на вертикальні переміщення шару ґрунту пропорційно до його товщини. Тобто

$$v_{Si} = -\frac{v_S}{n} \Delta h_i, \quad (8)$$

де  $v_{Si}$  – поправка в переміщенні  $i$ -го шару;  $n$  – кількість елементарних шарів ґрунту;  $\Delta h_i$  – товщина  $i$ -го шару.

Тобто можна визначити найімовірніше значення вертикальних переміщень будь-якої точки в  $i$ -му шарі ґрунту.

В окремому  $k$  шарі ґрунту величина будь-якої точки вертикального переміщення відповідно буде:

$$\Delta S_k = \sum_{i=1}^k h_k \frac{\beta_k}{E_{ok}} \sigma_{zk} + v_{sk}. \quad (9)$$

Отже, для визначення вертикальних переміщень окремих точок за формулами (5) та (9) необхідно знати значення напруг стиснення  $\sigma_{zi}$ .

Нині строгі розв'язання задачі для визначення деформацій напруг стиснених ґрунтів отримані лише для прямокутної форми навантаження, тобто коли верхній екран газосховища має прямокутну форму. В цьому випадку застосовують метод кутових точок для визначення напруг стиснення.

Для точок у центрі газосховища буде максимальна стиснена напруга [4]

$$\sigma_{zo} = K_o P, \quad (10)$$

для іншої точки  $i$  в межах навантаження прямокутника

$$\sigma_{zi} = K_i P, \quad (11)$$

де  $K_o$  і  $K_i$  – табличні значення коефіцієнтів, які визначають як функції відносної висоти і відношення сторін прямокутника завантаження відповідно до будівельних норм і правил:

$$\left. \begin{aligned} K_o &= f\left(\frac{2h}{b}, \frac{l}{b}\right) \\ K_c &= \frac{1}{4} f'\left(\frac{h}{b}, \frac{l}{b}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

де  $l$  і  $b$  – відповідно ширина і довжина прямокутника навантаження;  $h$  – висота точки, в якій визначають напругу.

Якщо площа завантаження має складну конфігурацію, то в цьому випадку для визначення напруг стиснення використовують метод елементарного підсумування. Суть цього методу полягає в тому, що напругу стиснення для кожної точки знаходять як суму напруг окремих навантажених ділянок

$$\sigma_{zi} = \sum_{i=1}^n K_i \frac{P_i}{h^2}, \quad (13)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт, який визначається за будівельними нормами та правилами як функція співвідношення  $r_i/h$  ( $r_i$  – проекція на горизонтальну площину відстані від центра тяжіння  $i$ -го елемента до точки  $i$ ,  $h$  – висота);  $P_i$  – навантаження  $i$ -ї ділянки;  $n$  – кількість елементів.

При застосуванні методу елементарного підсумування порівняно з методом кутових точок, похибка визначення напруги стиснення може досягати 10 %.

Отже, отримавши значення напруг, використовуючи методику визначення деформації ґрунтів, тобто їх вертикальних переміщень за формулою (9), можна, за наших допущень, визначити переміщення свердловин, що значно спрощує розрахунок цих переміщень, якщо б їх проводили за формулою (2). Однак зроблений висновок потребує практичних підтверджень.

В процесі експлуатації підземних сховищ газу важливим є питання не тільки визначення вертикальних переміщень топографічної поверхні газосховища та колон свердловин, але й встановлення відповідно до умови (4) напружено-деформованого стану труб свердловин, що вимагає, своєю чергою, визначення напруженості в тілі покрівлі газосховища.

Припускаючи лінійний зв'язок між вертикальними переміщеннями та напруженістю, зауважимо, що за результатами експериментальних досліджень вертикальні переміщення в центрі газосховища є найвищими і зменшуються до країв його контура. Графічно це зображено на рис. 2.

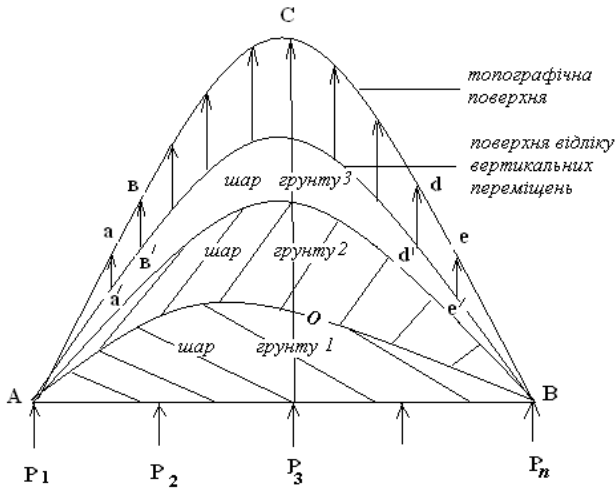


Рис. 2. Схема вертикальних переміщень топографічної поверхні ПСГ:

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  – рівномірні навантаження на верхній екран АОВ пласта-колектора;  $AC'B$  – поверхня відліку вертикальних переміщень;  $ACB$  – топографічна поверхня ПСГ;  $a, a', b, b', c, c', \dots, e, e'$  – вертикальні переміщення

Нерівномірність вертикальних переміщень по території ПСГ та їх спад до країв контуру пояснюється “защемленням” колектора – пласта нижнім та верхнім екраном у точках А та В по контуру газосховища.

Відповідно до розподілу вертикальних переміщень, аналогічно розподіляється напруга в товщі ґрунту верхнього екрана, яка лінійно пов'язана з розподілом напруг свердловин.

Визначивши вертикальні переміщення ґрунтів у точці, за наших допущень можна привіряти праві частини формул (9) і (2). Маємо

$$\sum_{i=1}^k h_i \frac{\beta_i}{E_{oi}} \sigma_{zi} + \nu_{si} = \frac{N_i L_i}{EA_i} \quad (14)$$

або, нехтуючи величиною  $\nu_{si}$ , отримаємо

$$N_i = \sum_{i=1}^k h_i \frac{\beta_i}{E_{oi}} \sigma_{zi} \frac{EA_i}{L_i} \quad (15)$$

Якщо прийняти загальний модуль пружності  $E_{oi}$  постійним для всіх шарів ґрунтів, формула (15) набуде вигляду

$$N_i = \frac{E}{E_{oi}} \cdot \frac{A}{L_i} \sum_{i=1}^k h_i \beta_i \sigma_{zi} \quad (16)$$

Формула (16) є робочою для визначення повздовжніх сил в  $i$ -х перерізах свердловин, а звідси за формулами (3) та (4) значення напружено-деформованого стану труб свердловин, що є важливим для встановлення ступеня їх безпечної експлуатації.

### Висновки

У результаті комплексного дослідження вертикальних переміщень топографічної поверхні та гирла

свердловин підземних сховищ газу на основі геодезичних вимірів з використанням теорії механіки ґрунтів та теорії визначення деформацій труб свердловин теоретично обґрунтована методика визначення напружено-деформованого стану труб свердловин на різних глибинах.

### Література

1. Перович І.Л. Моніторинг земної поверхні підземних сховищ газу: автореф. дис. канд. техн. наук. – К., 2006. – 17 с.
2. Мазницький А.С. Геодезичний моніторинг та прогнозування техногенної геодинаміки на родовищах нафти і газу: дис. д-ра тахн. наук. – К., 2002. – 264 с.
3. Бондарь А.Л. Оседание земной поверхности в районе Шебелинского газового месторождения // Геодезия и картография. – М., 1979. – Вып. 11. – С.16–18.
4. Цытович Н.А. Механика ґрунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – с. 279.
5. Перович І. Геодинамічні процеси територій підземних сховищ газу // Інженерна геодезія. – 2004. – № 50. – С. 180–191.
6. Гуртовий О.Г. Задачі і приклади з опору матеріалів: навч. посіб. / О.Г. Гуртовий, О.П. Приймак, С.І. Мошинський // Освіта України, 2009. – С. 400.

### Теоретичні аспекти моделювання процесів напружено-деформованого стану свердловин підземних сховищ газу

І. Перович, Р. Олеськів

Розроблена методика визначення напружено-деформованого стану свердловин внаслідок вертикальних рухів покрівлі газосховища, викликаних процесами нагнітання і відбору газу в пласті-колекторі.

### Теоретические аспекты моделирования процессов напряженно-деформированного состояния скважин подземных хранилищ газа

И. Перович, Р. Олеськив

Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния скважин вследствие вертикальных движений кровли газохранилища, вызванных процессами нагнетания и отбора газа в пласте-колекторе.

### Theoretical aspects of modeling of the stress-strained state of underground gas storage wells

I. Perovych, R. Oleskiw

A technique to determine the stress-strain state of wells due to vertical movements of the roof storage facilities caused by the processes of injection and bleed in the reservoir.