УДК 528.48

М.М.Дутчин

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСІДАНЬ ФУНДАМЕНТІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ

Забезпечення безвідмовної роботи трубопроводів і газоперекачувального обладнання є однією з важливих проблем газової промисловості. Під час експлуатації компресорних станцій (КС) найбільші динамічні навантаження припадають на фундаменти газоперекачувальних агрегатів (ГПА), вертикальні переміщення яких спричиняють порушення нормальної роботи основних вузлів ГПА. Окрім цього, в обв'язувальних трубопроводах входу-виходу газу, працюючих під високим тиском, виникають додаткові напруги. Згадані причини зумовлюють необхідність в геодезичних спостереженнях за вертикальними переміщеннями фундаментів ГПА і технологічного обладнання.

При спостереженнях за осіданнями і деформаціями важливо знати можливі причини їх виникнення. Значною мірою деформації

(С) Дутчин М.М., 1996

інженерних споруд залежать від несучої здатності ґрунтів, які залягають в основі фундаментів.

Оскільки складно отримати задовільно точні і надійні характеристики багатьох властивостей ґрунтів, які використовуються в розрахунках, на практиці часто обмежуються статистичним аналізом результатів спостережень.

Розрахунок точності геодезичних спостережень за осіданнями тісно пов'язаний зі значенням кінцевого (стабілізованого) осідання і швидкістю осідання за вибраний інтервал часу.

Значення кінцевих осідань рекомендують знаходити методом пошарового елементарного сумування [8]. Середнє кінцеве осідання S (при неможливості бічного розширення ґрунту) визначають від осьових вертикальних напруг, які проходять через центр ваги підошви фундаменту:

$$S = \sum_{i=1}^{1-h_a} h_i m_{v_i} \sigma_{z_i}, \qquad (1)$$

де h_i, m_{v_i}, σ_{z_i} - відповідно товщина, коефіцієнт відносного стиснення і стискуюча напруга окремого шару ґрунту [1,9].

Глибина активної зони стиснення h_a має задовольняти умові

$$\max \sigma_z < 0{,}2\gamma H. \qquad (2)$$

Тут γ - об'ємна вага ґрунту; H - висота шару ґрунту від природного рельєфу до глибини активної зони.

Коефіцієнт відносного стиснення m_v визначають за формулою [3].

$$m_v = \frac{a}{1 + e}, \qquad (3)$$

де a - коефіцієнт ущільнення ґрунту; e - коефіцієнт пористості ґрунту.

Згідно з [4] товщину ґрунту під фундаментом розбивають на смуги товщиною $h_i = 0{,}4b$ (b - ширина фундаменту), з урахуванням границь шарів.

Стискуючу напругу під центром прямокутного фундаменту визначають як

$$\sigma_z = KP_0, \qquad (4)$$

де K - коефіцієнт розсіювання напруги; P_0 - інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження.

Значення коефіцієнтів K_i знаходять за допомогою таблиць [9] як функції відносної глибини $\beta_i = 2z_i/b$ і співвідношення сторін фундаменту $\alpha = l/b$

$$K_i = f\left(\frac{2z_i}{b}, \frac{l}{b}\right), \qquad (5)$$

де l - довжина фундаменту; z_i - глибина залягання і-го шару ґрунту від підошви фундаменту.

Для фундаментів з шириною підошви $b < 10$ м враховують ефект заглиблення і у формулі (4) визначають додатковий тиск на ґрунт P на рівні підошви фундаменту

$$P = P_0 - \gamma h_\Phi, \qquad (6)$$

де γh_Φ - тиск від власної ваги ґрунту на рівні глибини закладання фундаменту h_Φ.

Для практичного використання формулу (1) залишемо у вигляді

$$S = m_{v_i} \sum_{i=1}^{i=h_e} \frac{\sigma_{zi} + \sigma_{zi+1}}{2} h_i. \qquad (7)$$

Окрім обчислення значення кінцевого осідання, важливим в розрахунок швидкості осідання, тобто зміна його в часі. Для цього користуються різними фізико-математичними моделями стиснення ґрунтів. Узагальнений розв'язок у замкнутому вигляді в даний час відсутній.

Через те, що в методі пошарового елементарного сумування строгий розв'язок просторової задачі консолідації отриманий тільки для невеликої кількості однорідних ґрунтів, розглянемо метод еквівалентного шару ґрунту, наведений в [9]. У даному методі просторова задача розрахунку осідань приводиться до одновимірної, що дає змогу, крім кінцевих осідань, визначити проходження осідання в часі.

Осідання S_t для будь-якого часу t виражається формулою

$$S_t = SU, \qquad (8)$$

де S - стабілізоване осідання; U - ступінь консолідації.

Значення кінцевого осідання визначають за формулою

$$S = h_e m_v P, \qquad (9)$$

де h_e - товщина еквівалентного шару ґрунту.

Товщину еквівалентного шару знаходять як

$$h_e = A\omega b. \qquad (10)$$

Тут A_ω - табульований коефіцієнт еквівалентного шару, який залежить від форми та жорсткості фундаменту (ω) і бічного розширення ґрунту (A).

Для неоднорідних ґрунтів у формулі (9) визначають середній приведений коефіцієнт відносного стиснення m_{v_m}

$$m_{v_m} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} h_i m_{v_i} z_i}{2\, h_e^2}, \qquad (11)$$

де z_i - віддалі від середини окремого шару ґрунту до глибини $2h_e$.

Формули (1) і (9) припускають лінійну залежність між напругами та деформаціями і справедливі тільки для фази ущільнення ґрунтів при

$$P \leqslant \text{почР}_{кр}, \qquad (12)$$

де $\text{почР}_{кр}$ - початкове критичне навантаження на ґрунт.

Значення $\text{почР}_{кр}$ розраховують за виразом

$$\text{почР}_{кр} = \frac{\pi(\gamma h + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma h. \qquad (13)$$

Тут γ - об'ємна вага ґрунту вище підошви фундаменту; c - зчеплення в ґрунті; φ - кут внутрішнього тертя; h - глибина закладання фундаменту.

У [8] критерієм для можливості фільтраційного ущільнення ґрунтів при ступені вологості $J_W \geqslant 0{,}85$ пропонується використовувати коефіцієнт консолідації.

Ступінь вологості (коефіцієнт водонасиченості) можна визначити за формулою

$$J_W = \frac{W\gamma_s}{e\gamma_W}, \qquad (14)$$

де W - природна вологість ґрунту; γ_s - питома вага часток ґрунту; γ_W - питома вага води.

Ступінь консолідації U залежить від розподілу додаткових напруг в основі фундаменту.

При трикутній формі еквівалентної епюри ущільнюючих тисків і односторонній фільтрації води (нагору) ступінь консолідації

записують у вигляді

$$U = 1 - \frac{16}{\pi^2}\left[\left(1 - \frac{2}{\pi}\right)e^{-N} + \frac{1}{9}\left(1 + \frac{2}{3\pi}\right)e^{-9N} + \cdots\right]. \qquad (15)$$

Значення параметра N в даному випадку обчислюють за формулою

$$N = \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}\, t, \qquad (16)$$

де H - висота еквівалентної епюри ($H = 2h_e$); C_v - коефіцієнт консолідації

$$C_v = \frac{k_{\phi m}}{m_{vm}\gamma_w}, \qquad (17)$$

$k_{\phi m}$ - середній коефіцієнт фільтрації

$$k_{\phi m} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{h_i}{k_{\phi i}}}.$$

Для практичних випадків при $U > 0{,}25$ у формулі (15) можна обмежитись першим членом ряду.

Протягом декількох років тематична група кафедри прикладної геодезії Івано-Франківського інституту нафти і газу здійснювала геодезичний контроль за деформаціями фундаментів ГПА, інженерно-технологічного обладнання та споруд компресорних станцій ВО "Прикарпаттрансгаз". Спостереження виконували методом високоточного геометричного нівелювання короткими променями із застосуванням нівелірів типу Н-05 і штрихових інварних реєк, згідно з існуючими правилами і нормативними документами [5-7].

За допомогою даних, інженерно-геологічних вишукувань розглянемо застосування наведених вище формул механіки ґрунтів для визначення осідань фундаментів ГПА однієї з компресорних станцій газопроводу "Союз".

Площадка КС складена важкими суглинками і глинами. Коефіцієнт відносної поперечної деформації ґрунту $\mu_o = 0{,}2$. Розміри фундаментів ГПА, м: довжина l - 17, ширина b - 4. Глибина закладання фундаментів 1,5 м. Навантаження на ґрунти основи 0,20 МПа.

Фізико-механічні характеристики ґрунтів подані в табл.1.
Додатковий тиск на ґрунт визначимо за формулою (6)

$$P = 20 - 0,02 \cdot 150 = 17 \text{ Н/см}^2 = 0,17 \text{ МПа}.$$

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів площадки КС

Параметри	Суглинок	Глина
Природна вологість W, %	18,8	22,5
Об'ємна вага вологого ґрунту γ, тс/м^3	2,00	2,02
Питома вага часток ґрунту γ_s, тс/м^3	2,72	2,74
Кут внутрішнього тертя φ, град.	25	21,5
Зчеплення, с	0,061	0,072
Коефіцієнт ущільнення a, см^2/Н	$4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт пористості, e	0,626	0,668
Коефіцієнт фільтрації k_Φ, см/с	$9,2 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$

Початкове критичне навантаження на ґрунт, згідно з (13), становить

$$\text{поч}P_{кр} = \frac{3,14(2,01 \cdot 1,5 + 6,6 \cdot 2,328)}{2,328 + 0,406 - 1,571} +$$

$$+ 2,01 \cdot 1,5 = 5,26 \text{ Н/см}^2 \approx 0,53 \text{ МПа}.$$

При обчисленні $\text{поч}P_{кр}$ прийняті середні значення величин γ, с і φ.

Оскільки 0,17 < 0,53, в ґрунті по підошві фундаменту не будуть виникати зони граничної рівноваги, і ґрунт буде знаходитись у фазі ущільнення.

Значення кінцевого осідання знайдемо, використовуючи формулу (7)

$$S = 2,46 \cdot 10^{-4} \cdot 6578 + 7,19 \cdot 10^{-4} \cdot 3809 = 4,4 \text{ см}.$$

Розрахунок осідання методом пошарового елементарного сумування наведений в табл.2. На рис.1 зображена епюра розподілу додаткових напруг в ґрунті під фундаментом.

Для визначення зміни осідання в часі розрахуємо спочатку стабілізоване осідання методом еквівалентного шару ґрунту.

Таблиця 2

Розрахунок осідань фундаменту ГПА методом пошарового елементарного сумування

z, м	2z/b	K	σ_z, Н/см^2	$\sigma_{z_{ср}}$, Н/см^2	h, см	$\sigma_{z_{ср}} \cdot h$, Н/см
0	0	1,000	17,00			
				15,98	160	2557
1,6	0,8	0,880	14,96			
				12,85	160	2056
3,2	1,6	0,632	10,74			
				8,93	220	1965
5,4	2,7	0,419	7,12			
Суглинок						[6578]
5,4	2,7	0,419	7,12			
				6,54	100	654
6,4	3,2	0,351	5,97			
				5,32	160	851
8,0	4,0	0,274	4,66			
				4.18	160	669
9,6	4,8	0,217	3,69			
				3,34	160	534
11,2	5,6	0,176	2,99			
				2,72	160	435
12,8	6,4	0,145	2,46			
				2,26	160	362
14,4	7,2	0,121	2,06			
				1,90	160	304
16,0	8,0	0,102	1,73			
Глина						[3809]

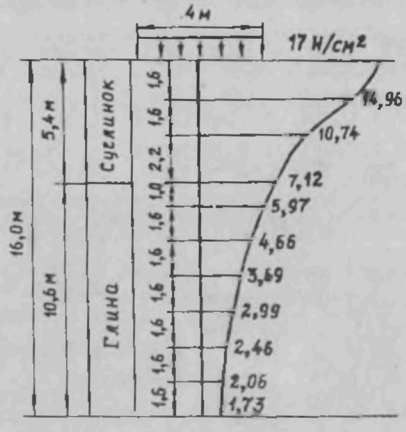

Рис.1. Епюра розподілу стискуючих напруг у ґрунті під фундаментом.

Товщину еквівалентного шару обчислимо за формулою (10)

$$h_e = 1{,}75 \cdot 4 = 7{,}0 \text{ м}.$$

Середній коефіцієнт відносного стиснення розраховуємо, використовуючи формулу (11)

$$m_{vm} = \frac{540 \cdot 2{,}46 \cdot 10^{-4} \cdot 1130 + 860 \cdot 7{,}19 \cdot 10^{-4} \cdot 430}{2 \cdot 700^2} = 4{,}24 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{Н}.$$

Значення стабілізованого осідання з урахуванням бічного розширення ґрунту, згідно з (9), становить

$$S = 700 \cdot 4{,}24 \cdot 40^{-4} \cdot 17 = 5{,}0 \text{ см}.$$

Щоб оцінити можливість застосування теорії фільтраційної консолідації, визначимо коефіцієнт водонасиченості ґрунту за формулою (14)

$$J_W = \frac{0{,}21 \cdot 27400}{0{,}647 \cdot 9810} = 0.91.$$

Оскільки 0,91 > 0,85, може бути прийнята теорія фільтраційної консолідації.

Середній коефіцієнт фільтрації визначаємо за формулою (18)

$$k_\Phi = \frac{1400}{540/28{,}8 + 860/18} = 21{,}0 \text{ см/рік}.$$

Коефіцієнт консолідації знаходимо за виразом (17)

$$C_v = \frac{21{,}0}{4{,}24 \cdot 10^{-4} \cdot 9{,}81 \cdot 10^{-3}} = 4\,832\,381 \text{ см}^2/\text{рік}.$$

Параметр N. відповідно до (16),

$$N = \frac{3{,}14^2 \cdot 4\,832\,381}{4 \cdot 1400^2} = 6{,}07t.$$

Значення осідань S_t, розрахованих за формулою (8), для різних ступенів консолідації U наведені в табл.3.

За даними табл. 3 побудована крива ущільнення ґрунту в основі фундаменту (рис.2).

В табл.4 подані середні значення вертикальних зміщень семи фундаментів ГПА КС. Спостереження виконували після стабілізації фільтраційного осідання.

Графік вертикальних переміщень фундаментів, побудовний за даними табл.4. зображений на рис.3.

Таблиця 3

Зміна осідань з часом у процесі фільтраційного ущільнення

Ступінь консолідації, U	Осідання S_t, мм	Час t, місяці
0,638	31,9	1
0,790	39,5	2
0,871	43,5	3
0,920	46,0	4
0,954	47,7	5
0,972	48,6	6
0,982	49,1	7
0,990	49,5	8
0,994	49,7	9
0,996	49,8	10
0,998	49,9	11
0,999	50,0	12

Таблиця 4

Вертикальні переміщення фундаментів ГПА
у процесі експлуатації КС

Цикли	Дата спостережень	Абсолютні осідання $S_{абс.}$, мм	Відносні осідання $S_{відн.}$, мм	Проміжок часу Δt, місяці
I	30.07.80	-		
			-1,0	2,57
II	17.10.80	-1,0		
			+3,3	6,87
III	13.05.81	+2,3		
			-2,7	32,23
IV	20.01.84	-0,4		
			+3,4	4,30
V	29.05.84	+3,0		
			-4,8	11,53
VI	16.05.85	-1,8		
			+6,2	13,3
VII	21.06.86	+4,4		
			-4,3	11,60
VIII	09.06.87	+0,1		
			-0,9	34,57
IX	26.04.90	-0,8		
			+0,5	40,33
X	06.09.93	-0,3		

Графік можна поділити на три характерні частини. Перша частина (цикли I-V) - через нерівномірні періоди спостережень закономірність зміщень не визначена; друга частина (цикли V-VIII) - за амплітудами коливань прослідковується періодичність зміщень з періодом близько одного року; третя частина (цикли VIII-X) - стабілізація осідань.

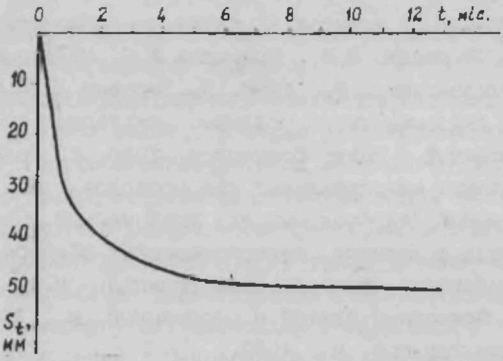

Рис.2. Крива ущільнення ґрунту в основі фундаменту.

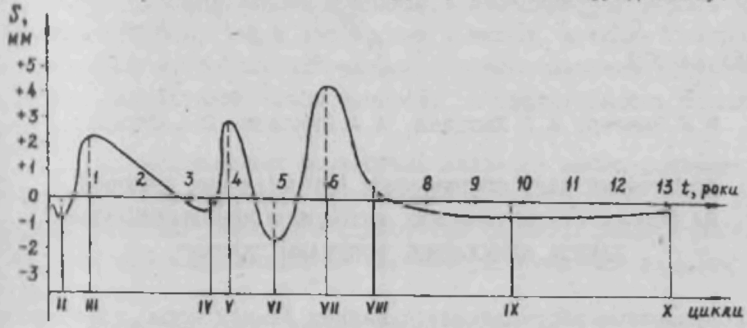

Рис.3. Вертикальні переміщення фундаментів ГПА.

На основі виконаних досліджень зробимо такі висновки:

- методи розрахунку кінцевих осідань можна застосувати при визначенні глибини закладання і можливих вертикальних зміщень вихідних реперів;

- осідання основ фундаментів, зумовлені процесом фільтраційного ущільнення, стабілізуються практично протягом одного року з моменту завантаження фундаментів ГПА (для даних типів ґрунтів);

- після стабілізації фільтраційного осідання вертикальні переміщення фундаментів характеризуються періодичними знакозмінними коливаннями, що вказує на необхідність спостережень за ними в процесі експлуатації прецизійних споруд.

1. Веселов В.А. Проектирование оснований и фундаментов. М., 1990. 2. Ганьшин В.Н. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов. М., 1981. 3. Дашко Р.Э.,

Каган А.А. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. М., 1977. 4. Зурнаджи В.А., Николаев В.В. Механика грунтов, основания и фундаменты. М., 1967. 5. Перович Л.Н. Руководство по контролю за деформациями и осадками инженерных сооружений компрессорных станций. Ивано-Франковск, 1986. 6. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов. М., 1982. 7. Регламент измерений, необходимых для технической диагностики газоперекачивающих агрегатов, технологических обвязок и общестанционного оборудования компрессорных станций. М., 1984. 8. СНиП 2.02.01.83. Основания зданий и сооружений. М., 1986. 9. Цытович Н.А. Механика грунтов. М., 1983.