

УДК 528.72/73

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕЛИКИХ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД РІВНЕНСЬКОЇ АЕС ЦИФРОВИМ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

В. Глотов, Т. Ільків

Національний університет “Львівська політехніка”

**Ключові слова:** цифрові знімальні камери, наземне цифрове стереофотограмметричне знімання, градієнтні, вентиляційні труби.

### Постановка проблеми

За останні роки цифрова фотограмметрія та лазерне сканування істотно розвинулись, що надало можливість цим методам стати конкурентними для генерацій ЦМР, фундаментального засобу для визначення моніторингу деформацій безконтактно та з відповідною точністю. Однак існують певні проблеми, що стосуються отримання, опрацювання даних та одержання відповідних результатів про об'єкти. Ці проблеми полягають передусім у тому, що для визначення геометричних параметрів градієнтів та коливань вентиляційних труб застосування наземного лазерного сканування є проблематичним, тому що віддаль до об'єктів або частин об'єктів є доволі великою, а з іншого боку – захопити коливання труб лазерним сканером проблематично. Спотворення також виникають через відбиття сигналів. Оскільки об'єкти, що досліджуються, не є вертикальною площиною а здебільшого наближеними до конусів або циліндрів, то це викликає відбиття променя на краях фактично в протилежний бік від приймача сигналу. Тому прийнято рішення застосувати наземне стереофотограмметричне знімання як один з оптимальних видів отримання кількісної та якісної інформації.

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

Сьогодні застосовують дуже різноманітні методи визначення деформації або коливання висотних інженерних споруд. Проаналізуємо деякі з них.

Відомий спосіб визначення коливань висотної споруди, наприклад труби, що передбачає встановлення на споруді до десяти чутливих сейсмовібраційних давачів (акселерометрів), радіосигнали з яких за трьома каналами передають через підсилювач та контролер до триканального блока модуляції, і далі через аналого-цифровий перетворювач до комп'ютера, виконують обробку та аналіз за допомогою відповідного програмного забезпечення [Применение мобильных диагностических комплексов для оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса зданий и сооружений / В. А. Котляревский, С. П. Суцев, В. И. Ларионов, А. И. Перепелицын].

Але за допомогою цього способу вимірюють тільки коливання в окремих точках споруди (у цьому комплексі тільки до 10), це потребує багато часу, що витрачається на підготовку обладнання та допоміжних засобів для кожного дослідження. І навіть більше, поверхня об'єкта (наприклад труби) може вимірюватись лише в тих точках, де встановлені давачі, а решта споруди залишається поза межами дослідження. Окрім цього, в цьому способі розташування давачів безпосередньо в зоні деформації вносить додаткові похибки. Істотним недоліком способу є його висока собівартість, зумовлена специфічністю його застосування і використанням дорогої номенклатурної апаратури.

Відомий спосіб визначення коливання висотної споруди, що передбачає знімання за допомогою цифрової знімальної камери з двох точок базису, опрацювання отриманої стереопари зображень на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) з визначенням координат точок на поверхні висотної споруди та обчислення за ними коливання висотної споруди [1].

Але цей спосіб недостатньо точний, оскільки знімання виконують з двох точок неодноразово.

### Постановка завдання

Поставлене завдання – необхідно вдосконалити спосіб визначення кількісних параметрів градієнтів та вентиляційних труб.

### Основний зміст роботи

Моніторинг інженерних споруд, як відомо, полягає переважно у дослідженні різноманітних відхилень від проектних вимог, а це дає можливість вчасно уникнути аварійних, а деколи і катастрофічних явищ [8]. Не завжди є можливість застосовувати геодезичні методи для розв'язування цих задач. Цифровий стереофотограмметричний метод є дистанційним та неактивним, що повністю унеможливило виникнення будь-яких аварійних ситуацій.

У поставленому завданні необхідно було розробити методики цифрового стереофотограмметричного методу для визначення радіусів градієнтів та коливань вентиляційних труб.

### Виклад основного матеріалу

Перейдемо до короткого розгляду розв'язання першої частини задачі: проаналізуємо методику визначення радіусів градієнтів запропонованим методом [1].

**Спосіб визначення радіусів градірень**

Підготовчі роботи передбачають такі процеси:

- дослідження камери для визначення фокусної віддалі, елементів внутрішнього орієнтування та дисторсії об’єктива;

- збір та аналіз матеріалів на район знімання; складання технічного проекту на виконання польових та камеральних робіт.

Знімання виконано цифровою неметричною камерою Canon EOS-450D, елементи внутрішнього орієнтування та дисторсію об’єктива визначено за відповідними способами [5, 6].

Довжина базису проектувалася залежно від віддалі до об’єкта та становила:  $B = Y/6 - Y/10$ ; промір довжини базису виконано за допомогою рулетки або світловіддалеміром електронного тахеометра.

Безпосередньо знімання виконувалося з підставки, в яку камера вставлялася за допомогою приладної втулки. При цьому штатив нахилився на поперечний кут і провадилося знімання, близьке до нормально нахиленого.

**Геодезичні вимірювання**

Перед виконанням геодезичних вимірів виконувалася комплекс підготовчих робіт, а саме:

- перевірки електронного тахеометра;
- створення абрису, на якому нанесено розташування опорних та контрольних точок.

Координати опорних та контрольних точок визначено прямою геодезичною або полярною засічкою. Опорними точками на поверхні градірні повинні бути контури, які під час подальшої обробки будуть чітко розпізнаватися на знімках. Ці точки мають бути рівномірно розташовані на поверхні градірні, частина якої підлягає зніманню. Доцільно, щоб опорних точок було не менше ніж дев’ять, з яких шість розташовують по краях видимої частини градірні, а решту – посередині між нижніми і верхніми точками. Збільшення кількості точок до 12–16 підвищує точність вимірювання.

**Особливості камеральної обробки знімків для визначення радіусів градірень**

Орієнтування зображень виконано на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) “Дельта-2”. Під час орієнтування цифрових зображень, як відомо, не потрібно виконувати процес внутрішнього орієнтування. Окрім цього, немає необхідності виконувати і процес взаємного орієнтування, оскільки обробляються наземні знімки. Отже, відразу переходять до зовнішнього орієнтування знімків. Для опрацювання застосовувалася обробка двох поодиноких знімків. Лінійні елементи зовнішнього орієнтування вводять у відповідні вікна, а початкові кутові значення приймають наближеними:  $\alpha = \alpha = 0^\circ$ ,  $\omega$  – залежно від нахилу камери (визначається в період геодезичних вимірів). Це стосується насамперед кута нахилу знімків, адже знімання ведеться з земної поверхні. Процес виконують методом послідовних наближень, візуючи марку на відповідні точки, дотримуючись класичної схеми орієнтування.

**Обчислення радіусів градірні**

Наступним етапом роботи є визначення радіусів градірень на заданих висотах. Для цього на заданій висоті  $Z_i$  візують вимірну марку на бокову (праву або ліву) сторону градірні та отримують координати цієї точки  $(X_L, Y_L)$ . Після цього переводять вимірну марку на другий край градірні, фіксуючи висоту  $(Z_i)$ , та визначають координати  $(X_R, Y_R)$ . Аналогічні виміри проводять тепер у визначеному центрі градірні між крайніми точками  $(X_{цент}, Y_{цент})$ . Безпосередньо обчислення радіусів на відповідних висотах виконують за формулами (див. рис. 1).

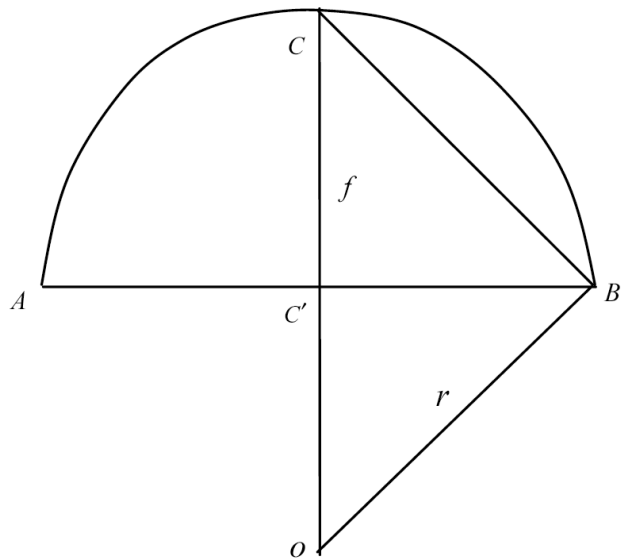


Рис. 1. Обчислення радіуса градірні

$$AB = X_L - X_R; \tag{1}$$

$$r^2 = a^2 + (r - f)^2; \tag{2}$$

$$r = \frac{a^2 + f^2}{2f}; \tag{3}$$

$$f = \left( \frac{Y_L + Y_R}{2} \right) + Y_{цент}.$$

Для обчислення апіорної оцінки точності способу скористаємося формулами нахиленого випадку знімання, оскільки інші кутові елементи орієнтування близькі до нульового значення [4]:

$$\begin{aligned} X_\phi &= \frac{B}{p} x_\lambda \\ Y_\phi &= \frac{B}{p} (f \cos \omega - z_\lambda \sin \omega), \\ Z_\phi &= \frac{B}{p} (f \sin \omega + z_\lambda \cos \omega) \end{aligned} \tag{4}$$

де  $B$  – базис знімання;  $x_\lambda, z_\lambda, p$  – координати точок на лівому знімку та повздовжній паралакс;  $f$  – фокусна віддаль знімальної камери.

Звідси:

$$\begin{aligned}
 m_{X_\phi} &= \left[ \left( \frac{Y_\phi x_l}{fB} \right)^2 m_B^2 + \left( \frac{Y_\phi}{f} \right)^2 m_{x_l}^2 + \left( \frac{Y_\phi^2 x_l}{f^2 B} \right)^2 m_p^2 \right]^{1/2} \\
 m_{Y_\phi} &= \left[ \left( \frac{Y_\phi (f \cos \omega - z_l \sin \omega)}{Bf} \right)^2 m_B^2 + \left( \frac{Y_\phi^2 (f \cos \omega - z_l \sin \omega)}{Bf^2} \right)^2 m_p^2 + \left( \frac{Y_\phi (-f \sin \omega - z_l \cos \omega)}{f} \right)^2 m_\omega^2 \right]^{1/2} \\
 m_{Z_\phi} &= \left[ \left( \frac{Y_\phi (f \sin \omega + z_l \cos \omega)}{Bf} \right)^2 m_B^2 + \left( \frac{Y_\phi}{f} \cos \omega \right)^2 m_{z_l}^2 + \left( \frac{Y_\phi^2 (f \sin \omega + z_l \cos \omega)}{Bf^2} \right)^2 m_p^2 + \left( \frac{Y_\phi (f \cos \omega - z_l \sin \omega)}{f} \right)^2 m_\omega^2 \right]^{1/2}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

де  $m_{X_\phi}, m_{Y_\phi}, m_{Z_\phi}$  – середні квадратичні похибки координат  $X_\phi, Y_\phi, Z_\phi$ ;  $m_B$  – середня квадратична похибка вимірювання базису знімання – 5 мм;  $m_{x_l}, m_{z_l}, m_p$  – середні квадратичні похибки вимірювання координат знімка  $x_l, z_l$  та паралаксу  $p$  – 0,005 мм;  $m_\omega$  – середня квадратична похибка визначення кута  $\omega$  – 3'' (у разі обчислення оберненою фотограмметричною засічкою).

Аналізуючи значення, обчислені за формулами (5), необхідно зробити певні висновки. Абсциса  $X_\phi$  визначається з точністю нормального випадку знімання. Стосовно похибок координат  $Y_\phi$  та  $Z_\phi$  треба зазначити, що вони будуть більші від похибок абсциси. Результати обчислень подано у табл. 1. Причому для порівняння у лівій частині подано СКП для нормального випадку, а у правій, відповідно, для нахиленого за максимального кута нахилу знімальної камери.

Таблиця 1

**Значення СКП для нормального та нахиленого випадку знімання**  
 $B = 30 \text{ м}, f = 50 \text{ мм}, x = 7 \text{ мм}, z = 11 \text{ мм}$

$Y_\phi, \text{ м}$	Нормальний випадок знімання			Нормально нахилений випадок знімання ( $\omega_{\max} = 20^\circ$ )		
	$m_{X_\phi}, \text{ м}$	$m_{Y_\phi}, \text{ м}$	$m_{Z_\phi}, \text{ м}$	$m_{X_\phi}, \text{ м}$	$m_{Y_\phi}, \text{ м}$	$m_{Z_\phi}, \text{ м}$
100	0,02	0,05	0,03	0,02	0,10	0,05
200	0,04	0,10	0,06	0,04	0,15	0,10
300	0,06	0,15	0,08	0,06	0,20	0,15
400	0,08	0,20	0,10	0,08	0,25	0,20

Тепер обчислимо апріорну точність визначення радіусів градирень. Скористаємося для цього формулою (3), враховуючи, що значення  $a$  та  $f$  встановлюють за допомогою вимірюваних координат на знімках, отримуємо СКП:

$$m_r = \sqrt{2 \left( \left( \frac{a}{f} \right)^2 m_a^2 + \left( \frac{f^2 - a^2}{2f^2} \right)^2 m_f^2 \right)^{1/2}}. \tag{6}$$

Підрахуємо значення СКП за середньої відстані до об'єкта – 200 м, відповідно середні значення півдовжини хорди та висоти сегмента у цьому випадку становлять:  $a = 40 \text{ м}, f = 25 \text{ м}$ , тоді максимальна похибка по осі  $Y$  буде  $m_r = 0,27 \text{ м}$ .

**Спосіб визначення коливання вентиляційних труб**

Розглянемо сутність способу. Сполучають цифрові знімальні камери між собою для синхронного знімання з двох точок базису за допомогою синхронізатора. Він являє собою електронний інтервалометр, що через встановлений час подає аналоговий сигнал на виконання експозиції до камер. Крок інтервалу – 0,1 с, діапазон – до 50 с. Отже, на ньому встановлюють періодичність знімання, виконують знімання одночасно з двох точок базису за допомогою двох цифрових знімальних камер, отримані цифрові зображення опрацьовують на ЦФС “Дельта-2”. Вимірюють стереоскопічно координати крайніх точок  $1_i$  та  $2_i$  верхньої та 3 і 4 нижньої частини об'єкта послідовно на всіх синхронно отриманих стереопарах у вікні “Взаємне орієнтування” (рис. 2).

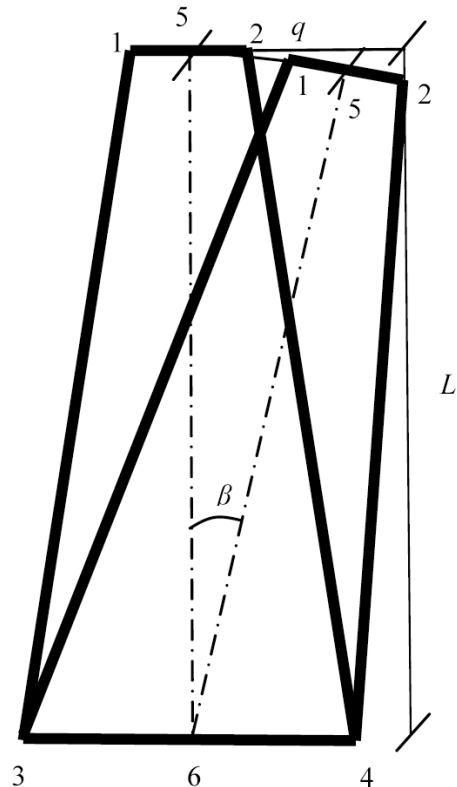


Рис. 2. Вентиляційна труба 1 та 2 ергоблоків

Розраховують різниці пар точок 1–2 (1'–2') та 3–4 та обчислюють середнє значення цих пар (точки 5, 5' і 6), тобто визначають відлік середини верхньої та нижньої частин труби. Після цього вибирають максимальну різницю між цими координатами та обчислюють лінійне відхилення  $q$  за формулою

$$q = x_{\max} - x_{\min} \tag{7}$$

де  $x_{\max}$  – значення координати центра труби у верхній частині  $i$ -ї стереопари за максимального відхилення від вертикальної осі;  $x_{\min}$  – значення координати центра труби у верхній частині  $i$ -ї стереопари за мінімального відхилення від вертикальної осі. Лінійне відхилення труби обчислюють з урахуванням масштабного коефіцієнта, який є відношенням розміра параметрів об'єктів, виміряних на стереопарі, до реального розміру. За значеннями лінійного відхилення роблять висновки про коливання висотної споруди.

Обчислимо апріорну оцінку точності лінійного відхилення труб за формулою (7).

$$m_q = (2m_x^2)^{1/2} \tag{8}$$

Враховуючи точність вимірів координат на ЦФС та значення масштабного коефіцієнта, отримаємо:  $m_q \approx 1,2$  см.

Для визначення коливання труб від повітряних потоків здійснено періодичне короткотривале знімання з підвітряної сторони за швидкості вітру 3 м/с, виміряної на висоті 50 м. У результаті синхронізованого стереоскопічного знімання з інтервалом 1,5 с отримано результати коливань, які подано у табл. 2–4 та на рис. 3–5.

Таблиця 2

**Результати коливань вентиляційної труби блоків 1, 2 південно-західна сторона**

№ з/п	Інтервал знімання $t$ , с	Виміри відхилень на ЦФС $\delta$ , мкм	Реальні значення відхилень $\Delta$ , см
1	0	40	7
2	1,5	55	10
3	3,0	38	7
4	4,5	78	14
5	6,0	78	14
6	7,5	63	11
7	9,0	0	0
8	10,5	65	12
9	12,0	69	12
10	13,5	69	12
11	15,0	37	7
12	16,5	67	12
13	18,0	66	12
14	19,5	75	13
15	21,0	83	15
16	22,5	33	6
17	24,0	54	10
18	25,5	49	9
19	27,0	32	6
20	28,5	111	20

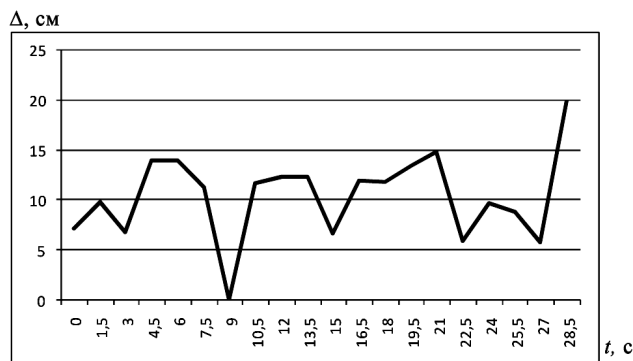


Рис. 3. Графік коливань вентиляційної труби блоків 1 та 2 (південна сторона)

Таблиця 3

**Результати коливань вентиляційної труби блоків 1, 2 північно-західна сторона**

№ з/п	Інтервал знімання $t$ , с	Виміри відхилень на ЦФС $\delta$ , мкм	Реальні значення відхилень $\Delta$ , см
1	0	41	7
2	1,5	37	7
3	3,0	43	8
4	4,5	36	7
5	6,0	28	5
6	7,5	3	1
7	9,0	5	1
8	10,5	3	1
9	12,0	20	4
10	13,5	0	0
11	15,0	14	2
12	16,5	3	1
13	18,0	10	2
14	19,5	10	2
15	21,0	27	5
16	22,5	32	6
17	24,0	29	5
18	25,5	28	5
19	27,0	38	7
20	28,5	37	7

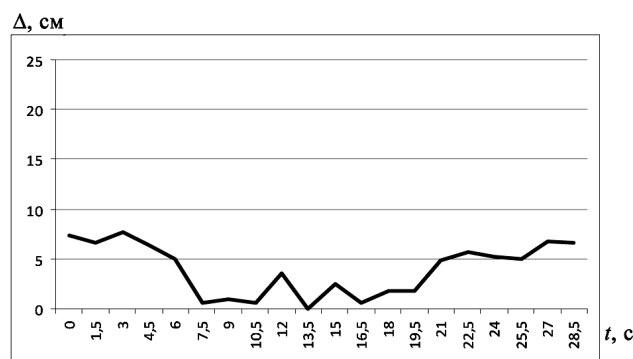


Рис. 4. Графік коливань вентиляційної труби блоків 1 та 2 (західна сторона)

Таблиця 4

**Результати коливань вентиляційної труби  
блоків 1, 2 північно-східна сторона**

№ з/п	Інтервал знімання $t$ , с	Виміри відхилень на ЦФС $\delta$ , мкм	Реальні значення відхилень $\Delta$ , см
1	0	37	7
2	1,5	45	8
3	3,0	64	11
4	4,5	58	10
5	6,0	47	8
6	7,5	30	5
7	9,0	23	4
8	10,5	33	6
9	12,0	33	6
10	13,5	25	4
11	15,0	22	4
12	16,5	1	0
13	18,0	0	0
14	19,5	10	2
15	21,0	29	5
16	22,5	41	7
17	24,0	34	6
18	25,5	29	5
19	27,0	32	6
20	28,5	31	6

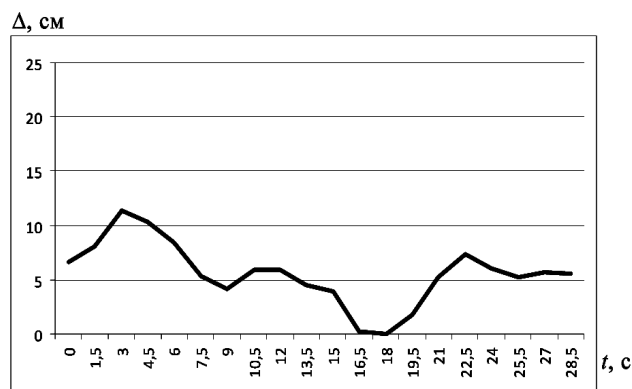


Рис. 5. Графік коливань вентиляційної труби блоків 1 та 2 (північна сторона)

**Результати**

У результаті досліджень отримано значення радіусів градирень Рівненської АЕС. Розрахунок апріорної оцінки точності дав можливість об'єктивно оцінити отримані результати моніторингу вищевказаних об'єктів. Для порівняльного аналізу в табл. 5 наведено СКП оцінки точності орієнтування знімків градирень. Порівнюючи ці дані з даними табл. 1, необхідно зазначити, що похибки одного порядку, а відтак і точність визначення радіусів не перевищує розрахункову.

Таблиця 5

**Значення СКП орієнтування знімків градирень**

Назва об'єкта	Відстань до об'єкта, м	$m_x$ , м	$m_y$ , м	$m_z$ , м
Град № 1 (захід)	180	0,11	0,17	0,08
Град № 1 (північ)		0,14	0,10	0,13
Град № 2 (схід)		0,09	0,05	0,09
Град № 2 (північ)		0,08	0,11	0,10
Град № 3 (півд-з)		0,17	0,18	0,09
Град № 3 (півн-з)		0,15	0,18	0,12
Град № 4 (схід)		0,07	0,08	0,06
Град № 5 (захід)		0,21	0,23	0,06
Град № 5 (схід)		0,15	0,19	0,08
Град № 6 (захід)		0,11	0,14	0,16
Град № 6 (схід)		0,22	0,21	0,09

Стосовно визначення коливань вентиляційних труб: аналіз результатів, наведених у табл. 2–4 та на рис. 3–5, дає змогу зробити певні висновки. По-перше, запропонований спосіб дає можливість визначити відхилення труби в межах фактично точності вимірів знімків. По-друге, це забезпечує отримання реального положення верхівки висотної споруди у фіксований час, а відтак отримання амплітуди її коливання в градусній або лінійній мірі.

**Висновки**

Експериментальні роботи із застосуванням лазерних віддалемірів показали, що на краях градирень у верхніх частинах лазерний промінь розсіюється завдяки кутам відбиття та пароутворюванню. Це призводить до додаткових промірів, а інколи – до неможливості відобразити поверхню градири. Окрім цього, з міркувань безпеки експлуатаційники не погоджуються на довготривале використання лазерних приладів на території АЕС.

1. Визначення апріорної оцінки точності дало можливість реально встановити точність запропонованого методу обчислення радіусів градирень.

2. Аналіз отриманих формул та результатів дає підстави стверджувати, що для підвищення точності методу необхідно збільшувати фокусну віддачу знімальної камери, а відтак, за можливості, збільшувати відстань знімання, при цьому зменшуватиметься кут нахилу камери. Якщо неможливо збільшити відстань знімання, об'єкти потрібно знімати частинами, з максимальною фокусною віддаллю, що також дасть змогу підвищити точність.

3. Розроблений та апробований спосіб визначення коливань вентиляційних труб цифровим стереофотограмметричним методом. Цей спосіб дав змогу отримати реальні положення труб у короткочасовому інтервалі, причому цей матеріал є об'єктивним, оскільки зафіксований у цифровому вигляді.

**Перспективи подальших досліджень**

Надалі плануємо дослідити детальніше технологію визначення коливань висотних споруд та докладно оцінити точність отриманих матеріалів, а також провести розрахунково-обчислювальні роботи, щоб визначити вигляд апроксимуючих функцій цього явища.

**Література**

1. Глотов В. М. Методи навігаційно-цифрової фотограмметрії при дослідженні кінематичних процесів: дис. ... д-ра техн. наук. – Львів, 2007. – С. 138.
2. Технологія визначення деформацій інженерних споруд Рівненської АЕС цифровим стереофотограмметричним методом / Глотов В., Ільків Т., Чижевський В., Петров В., Шпаківський П., Шпаківський О. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2008. – № 1. – С. 220–225.
3. Глотов В., Третяк К., Грицюк Т. Експериментальна оцінка точності визначення короткоперіодичних зміщень інженерних споруд електронним роботизованим тахеометром Leica TPS 1201 // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS технології: зб. наук. матер. XIV Міжн. наук.-техн. симпозиуму (Алушта, вересень 2010). – Львів, 2010. – С. 44–49.
4. Прикладна фотограмметрія / Катужков А. Т., Сердюков В. М. та ін. – Київ: Видавництво КДУБА, 1993.
5. Глотов В., Пашетник О. Спосіб визначення планових елементів внутрішнього орієнтування, дисторсії, похибок збільшення об'єктиву та положення ПЗЗ-матриці цифрових знімальних камер // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS технології: зб. наук. матер. XIV Міжн. наук.-техн. симпозиуму (Алушта, вересень 2009). – Львів, 2009. – С. 192–195.
6. Глотов В. М., Пашетник О. Д. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери: патент на винахід № 99984 Україна Бюл. № 25.10.2012.
7. Ke T., Zhang Z., Huang Sh. The Scanning Photogrammetry // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 2012. – P. 345–349.
8. Ri S., Tsuda H. Measurement Small Deformations of Structures using large A Digital Camera //

SPIE Newsroom, 2013. – P. 2–3. [DOI: 10.1117/2.1201305.004877].

**Технологічні особливості визначення кількісних параметрів великих інженерних споруд Рівненської АЕС цифровим стереофотограмметричним методом**

В. Глотов, Т. Ільків

Подана технологічна схема цифрового стереофотограмметричного методу для визначення змін параметрів градирень і вентиляційних труб. Визначено апріорну оцінку методу і відносно цього враховано особливості запропонованої методики. Увагу зосереджено на можливості підвищення точності та врахуванні помилок, які виникають у ході реалізації методу.

**Технологические особенности определения количественных параметров крупных инженерных сооружений Ровенской АЭС цифровым стереофотограмметрическим методом**

В. Глотов, Т. Ильків

Представлена технологическая схема цифрового стереофотограмметрического метода для определения изменений параметров градирен и вентиляционных труб. Определена априорная оценка метода и относительно этого учтены особенности предложенной методики. Акцентируется внимание на возможности повышения точности и учета ошибок, возникающих при реализации метода.

**Technological peculiarities of determination of quantitative parameters of large engineering structures on Rivne NPP by digital stereophotogrammetric method**

V. Hlotov, T. Ilkiv

Technological scheme of a digital stereophotogrammetric method for determining changes in the parameters of cooling towers and ventilation pipes is presented. A priori assessment of method is determined and peculiarities of the proposed technique are considered. Attention is focused on the possibility of improving the accuracy and accounting errors arising in the implementation of the method.



[www.fig.net/fig2015](http://www.fig.net/fig2015)