

УДК 528.48

д.т.н., професор Шульц Р.В.,  
к.т.н., доцент Ісаєв О.П., Стрілець В.С.,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОНСТРУКЦІЙ НА ТОЧНІСТЬ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ

*Розглянуто питання вивчення впливу похибок вимірювання температури будівельних конструкцій при виконанні геодезичних робіт. Розглянуто елементарну модель лінійного розширення будівельної конструкції у вигляді стержня і виконано розрахунок середніх квадратичних похибок у визначенні його довжини внаслідок неточного вимірювання температури. Використовуючи теорію розмірних ланцюгів виконано розрахунок впливу похибки вимірювання температури при монтажі ланцюгу, що складається з 20 ланок. Досліджено три моделі кореляційних зав'язків між ланками ланцюгу та визначено вплив цих зав'язків на похибку замикаючої ланки. Встановлено, що при монтажі конструкції довжиною 200 м з 20 ланок, для забезпечення середньої квадратичної похибки замикаючої ланки 5 мм достатньо виконувати вимірювання температури конструкцій з середньою квадратичною похибкою  $\pm 2^\circ$ .*

**Постановка завдання.** Інженерно-геодезичне забезпечення зведення сучасних інженерних споруд є складним та комплексним завданням. На сьогоднішній день значно ускладнилась геометрія споруд та збільшились їх розміри. За таких умов питання врахування впливу температури будівельних конструкцій на виконання геодезичних робіт набуло нового змісту. Технологія зведення інженерних споруд не дозволяє нехтувати коливанням розмірів окремих конструктивних елементів та зведеної частини споруди внаслідок зміни температури. Використання методів будівельної механіки дозволяє побудувати надійні розрахункові моделі для обчислення температурних деформацій конструкцій та ввести їх як додаткові величини у розмічувальні елементи або у виміряні переміщення при проведенні геодезичного моніторингу. Завдяки цьому ми отримуємо величини вільні від впливу температурних деформацій. Однак, для виконання геодезичних робіт актуальним є питання точності з якою необхідно враховувати вплив температурних деформацій. Очевидно, що розрахункові моделі будівельної механіки дозволяють обчислити температурні деформації з необхідною, наперед заданою точністю. В такому випадку на точність геодезичних робіт будуть впливати залишкові похибки неврахування температурних деформацій.

Залишкові похибки, пов'язані з недосконалістю розрахункової моделі матимуть систематичний характер і можуть бути зведені до мінімальної допустимої величини. Похибки, що пов'язані із неточністю вимірювання температури будуть мати випадковий характер і увійдуть до загальної похибки встановлення конструкції у проектне положення. Таким чином актуальним є питання з якою точністю необхідно вимірювати температуру будівельних конструкцій, щоб її впливом на точність геодезичних робіт можна було знехтувати або отримати з наперед заданою точністю. Вирішення цього завдання пропонується виконати з використанням теорії розмірних ланцюгів.

**Огляд літературних джерел.** У попередніх роботах [12,13] авторами було запропоновано та розроблено загальну методику та моделі врахування впливу температурних деформацій конструкцій на точність виконання геодезичних робіт. Оскільки, вплив похибки вимірювання температури може накопичуватись при збільшенні кількості вже змонтованих конструкцій, то аналіз накопичення цих похибок зручно виконати з використанням теорії розмірних ланцюгів [1], що розповсюджена при аналізі точності монтажу конструкцій і деталей в машинобудуванні [9]. Теорія розмірних ланцюгів достатньо добре зарекомендувала при виконанні розрахунків точності в інженерній геодезії [4,5]. Детальний аналіз прикладного застосування теорії розмірних ланцюгів в геодезії наведено в роботах [2,3,6,7,10,11]. В роботах [10,11], звертається увага на те, що температурні деформації обов'язково слід враховувати при написанні рівняння розмірного ланцюга, проте досліджень, пов'язаних з точністю визначення цих деформацій у проаналізованих роботах не наведено.

**Мета.** Метою дослідження є визначення точності з якою необхідно вимірювати температуру будівельних конструкцій при врахуванні впливу їх деформацій під час виконання геодезичних робіт.

**Виклад основного матеріалу.** Вихідним рівнянням, що його використовують при розрахунку точності геодезичних робіт, є загально відоме рівняння точності встановлення конструкцій у проектне положення або зведення всієї споруди в цілому [8].

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^k c_{ВИГ}^2 \delta_{ВИГ}^2 + \sum_{i=1}^k c_{МОНТ}^2 \delta_{МОНТ}^2 + \sum_{i=1}^k c_{ГЕОД}^2 \delta_{ГЕОД}^2 + \sum_{i=1}^k c_{ТЕМП}^2 \delta_{ТЕМП}^2} \quad (1)$$

де,  $\delta_{ВИГ}$  - допустиме відхилення виготовлення конструкції;  $\delta_{МОНТ}$  - допустиме відхилення будівельно-монтажних робіт;  $\delta_{ГЕОД}$  - допустиме відхилення геодезичних робіт;  $\delta_{ТЕМП}$  - допустиме відхилення внаслідок впливу температурної деформації конструкцій;  $c$  – нормовані коефіцієнти, що залежать від умов робіт.

В загальному випадку допустимі відхилення  $\delta$  представляють загальний

вплив випадкових і систематичних похибок, тому в розгорнутому вигляді для ланцюга з  $n$  ланок матиме вигляд:

$$\delta = t\sqrt{n \cdot m_{ВИГ}^2 + n \cdot m_{МОИТ}^2 + n \cdot m_{ГЕОД}^2 + n \cdot m_{ТЕМП}^2} + n(\xi_{ВИГ} + \xi_{МОИТ} + \xi_{ГЕОД} + \xi_{ТЕМП}), \quad (2)$$

Значення коефіцієнтів  $c$  встановлюють у залежності від технології зведення споруди. В нашому випадку, для оцінювання впливу окремого джерела похибок приймемо, що коефіцієнти  $c$  дорівнюють 1. Замінімо допустимі відхилення на СКП та врахуємо, що систематичні похибки вже виключено з результатів вимірювань, тоді рівняння (2) матиме вигляд:

$$m = \sqrt{n \cdot m_{ВИГ}^2 + n \cdot m_{МОИТ}^2 + n \cdot m_{ГЕОД}^2 + n \cdot m_{ТЕМП}^2}. \quad (3)$$

Похибку температури для розмірного ланцюга з 20-ти ланок представимо наступним виразом:

$$m_{ТЕМП}^2 = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + \dots + m_{20}^2 + 2r_{12}m_1m_2 + 2r_{13}m_1m_3 + 2r_{14}m_1m_4 + \dots + 2r_{1920}m_{19}m_{20}, \quad (4)$$

де  $m_i$  - СКП за вплив похибки вимірювання температури конструкції  $i$ -ї ланки;  $r_{ij}$  - коефіцієнт кореляції між різними ланками розмірного ланцюга.

Для визначення похибок  $m_i$  використаємо найпростішу модель лінійного розширення стержня.

$$\Delta L = \alpha L(t - t_0), \quad (5)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт температурного розширення матеріалу;  $t$  - температура конструкції;  $t_0$  - температура при якій визначено номінальну довжину конструкції.

Якщо від виразу (5) перейти до СКП, то отримаємо два вирази:

$$m_{\Delta t}(1) = \alpha L m_t, \quad (6)$$

для випадку, коли температура конструкції вимірюється з похибкою  $m_t$ , та

$$m_t = m_{t_0} = m \Rightarrow m_{\Delta t}(2) = \alpha L m \sqrt{2}, \quad (7)$$

для випадку, коли вимірювання номінальної довжини конструкції також виконувалось з похибкою. За виразами (6) та (7) для конструкції довжиною  $L = 10000$  мм з коефіцієнтом температурного розширення  $\alpha = 12,5 \times 10^{-6}$  виконаємо розрахунки похибок у довжині конструкції. Розрахунки представлено у Табл. 1.

Табл. 1

**Похибки довжин конструкцій**

$m, ^\circ$	0,5	1	2	3
$m_{\Delta t}(1), \text{ мм}$	0,06	0,13	0,25	0,38
$m_{\Delta t}(2), \text{ мм}$	0,09	0,18	0,35	0,53

Маючи похибки окремої ланки, розрахуємо, яким чином накопичуються ці похибки при зведенні споруди в цілому. Для такого розрахунку необхідно

прийняти додаткову умову, а саме закон за яким накопичуються похибки в розмірному ланцюгу. Найпростішим випадком є той, в якому похибки накопичуються пропорційно кількості ланок:

$$m_{ТЕМП} = \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i^2} = m_{\Delta t} \sqrt{n}. \quad (8)$$

За виразом (8) виконано розрахунки для споруди, що має довжину 200 м і складається з 20 ланок. Розрахунки для виразів (6) і (7) представлено на рис. 1 і рис. 2.

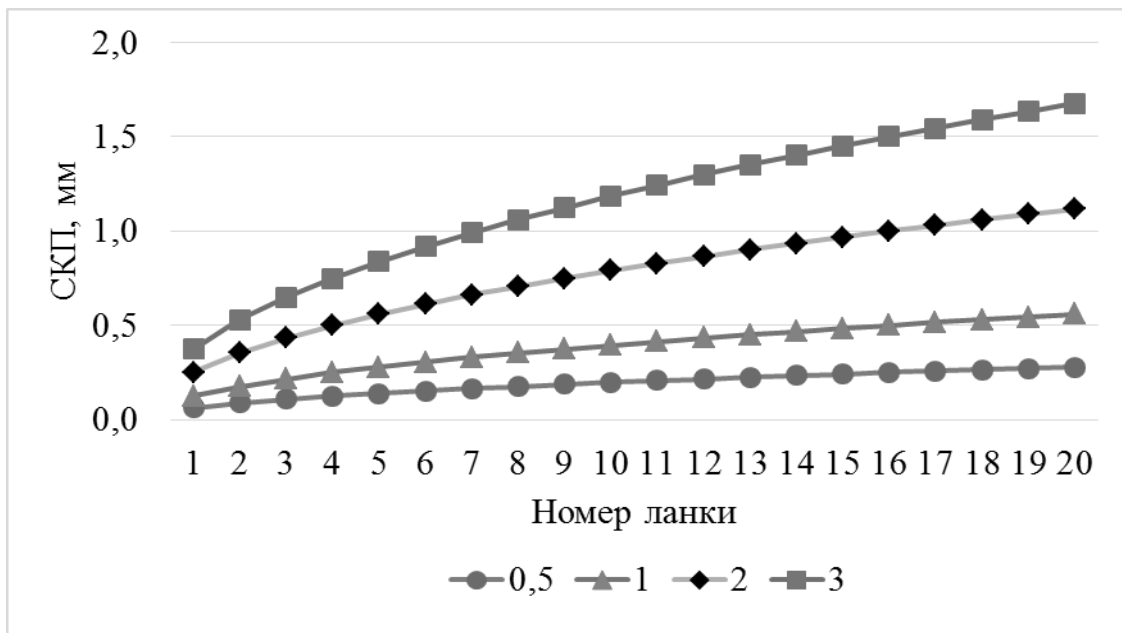


Рис. 1. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при відсутності кореляційних зв'язків  $m_{\Delta t}(1)$

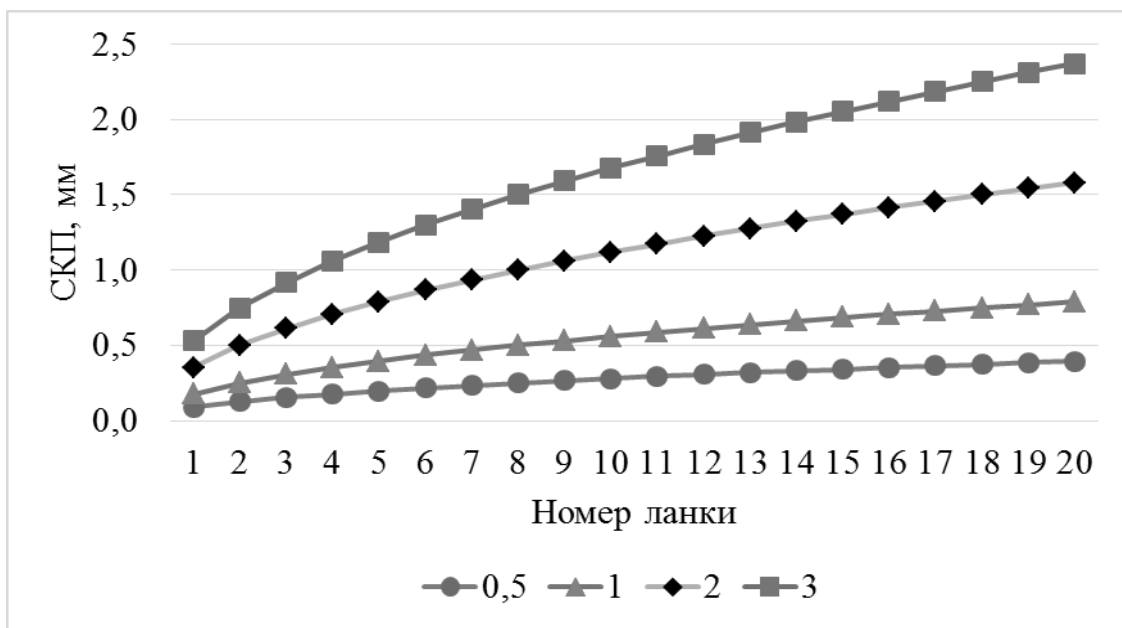


Рис. 2. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при відсутності кореляційних зв'язків  $m_{\Delta t}(2)$

Як бачимо, навіть при значній кількості ланок в розмірному ланцюгу допустиме відхилення за вплив похибки вимірювання температури конструкції не перевищує 5 мм. Проте такий варіант є ідеалізованим. У дійсності між окремими конструктивними елементами існують кореляційні зв'язки. Тому розрахуємо вплив похибки вимірювання температури для трьох різних моделей кореляційних зав'язків. Коефіцієнти кореляції між похибками окремих ланок розрахуємо за виразом  $r(\lambda_i \lambda_j) = \pm \frac{i}{\sqrt{ij}}$ .

Модель 1. В цій моделі прийнемо, що всі кореляційні зв'язки мають додатні значення:

$$\Delta_I = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \dots + \lambda_{17} + \lambda_{18} + \lambda_{19} + \lambda_{20}.$$

Результати розрахунку наведено на рис. 3 і рис. 4.

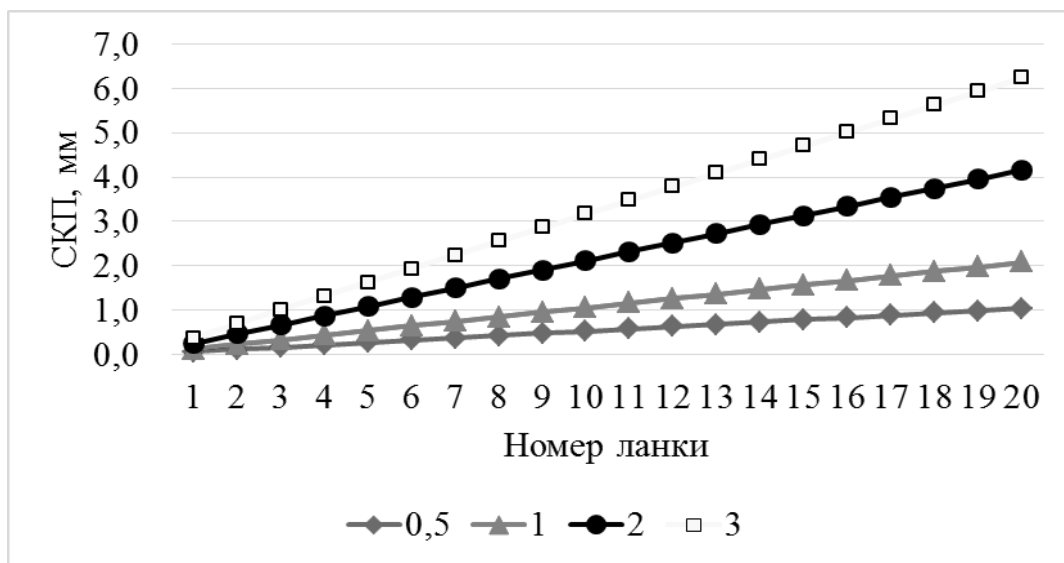


Рис. 3. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при врахуванні кореляційних зв'язків за моделлю 1  $m_{\Delta_I}(1)$

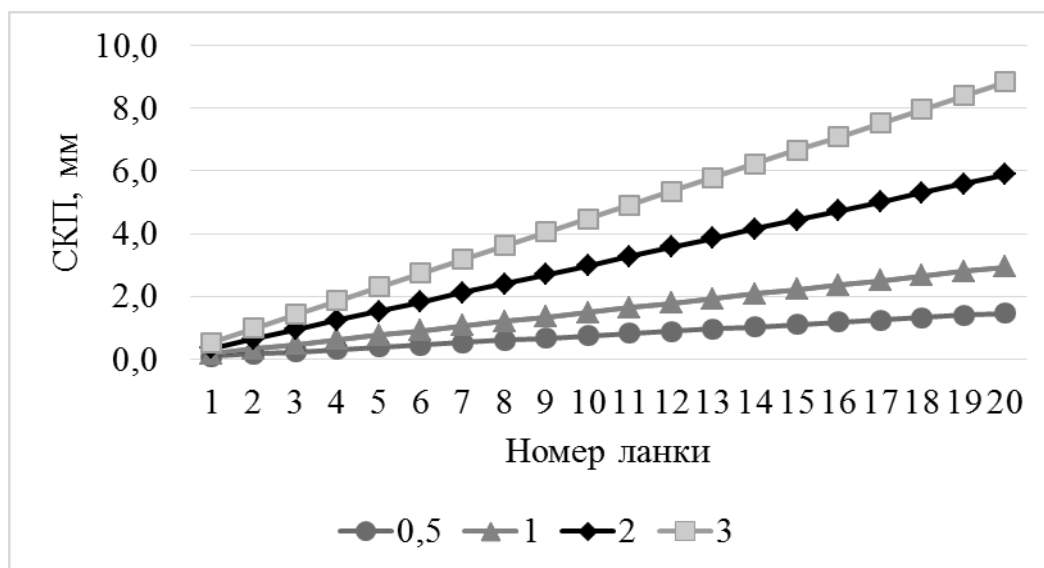


Рис. 4. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при врахуванні кореляційних зв'язків за моделлю 1  $m_{\Delta_I}(2)$

Очевидно, що допустиме відхилення за таких кореляційних зав'язків досягає майже 20 мм і нехтувати такими похибками неприпустимо.

Модель 2. В цій моделі приймемо, що кореляційні зв'язки між похибками змінюють значення за наступним виразом:

$$\Delta_{II} = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 + \lambda_4 - \lambda_5 + \lambda_6 - \lambda_7 + \dots + \lambda_{16} - \lambda_{17} + \lambda_{18} - \lambda_{19} + \lambda_{20}$$

Результати розрахунку наведено на рис. 5 і рис. 6.

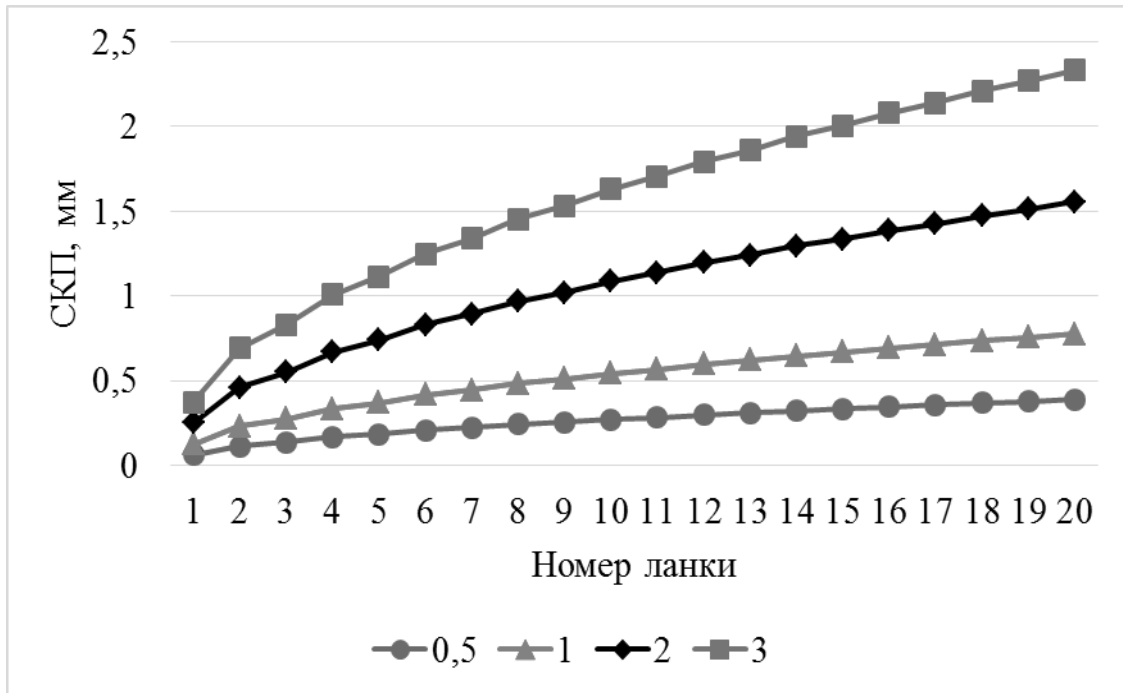


Рис. 5. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при врахуванні кореляційних зав'язків за моделлю 2  $m_{\Delta t}(1)$

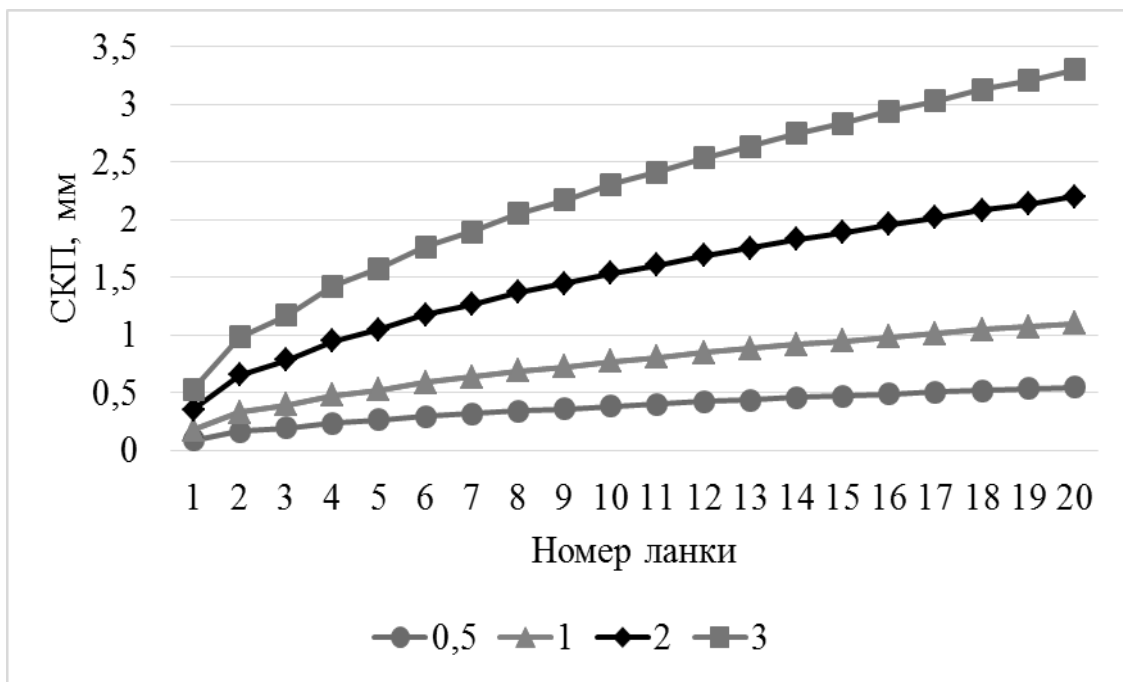


Рис. 6. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при врахуванні кореляційних зав'язків за моделлю 2  $m_{\Delta t}(2)$

Модель 3. В цій моделі приймемо, що кореляційні зв'язки між похибками змінюють значення за наступним виразом:

$$\Delta_{III} = \delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4 + \delta_5 - \delta_6 + \delta_7 - \dots - \delta_{16} + \delta_{17} - \delta_{18} + \delta_{19} - \delta_{20}$$

Результати розрахунку наведено на рис. 7 і рис. 8.

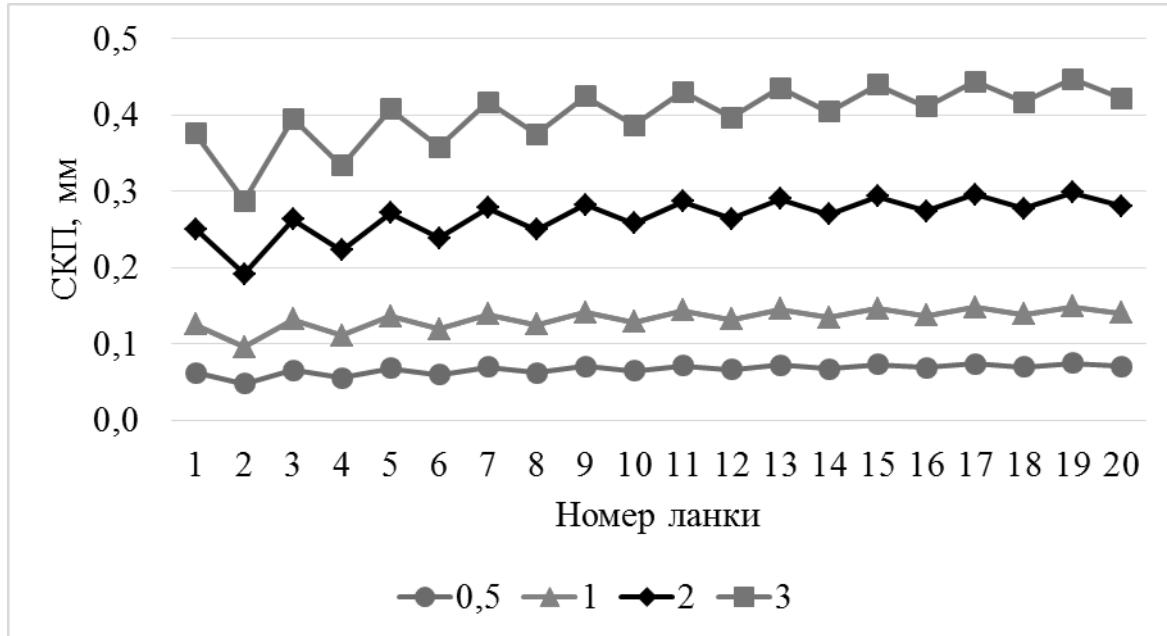


Рис. 7. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при врахуванні кореляційних зав'язків за моделлю 3  $m_{\Delta t}(1)$

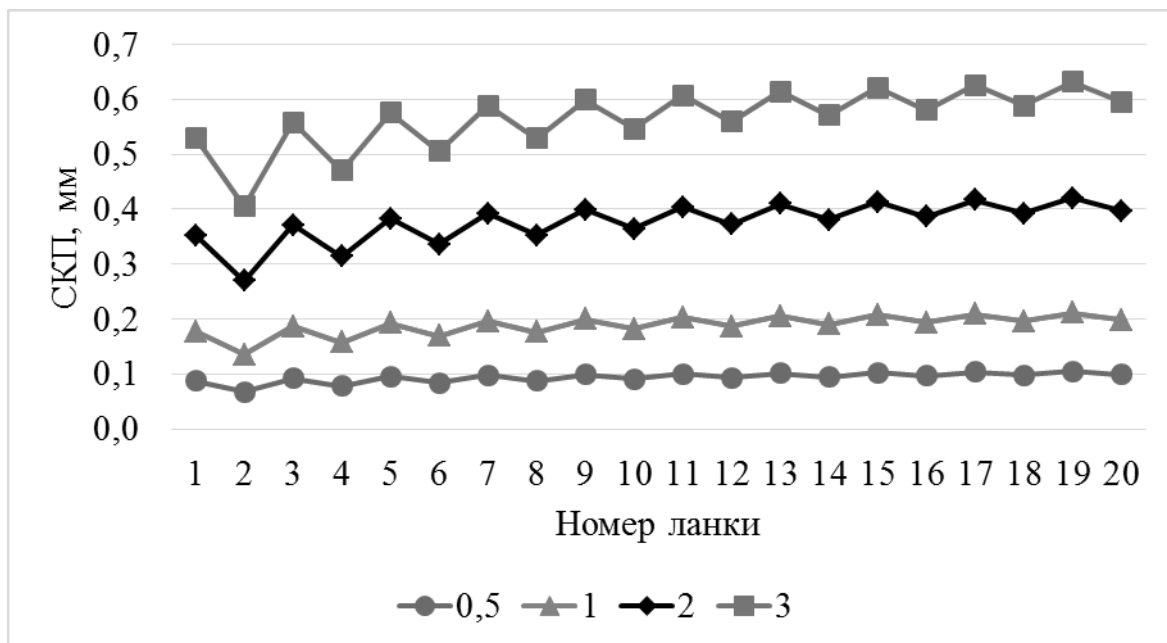


Рис. 8. Накопичення похибок в розмірному ланцюгу при врахуванні кореляційних зав'язків за моделлю 3  $m_{\Delta t}(2)$

Отримані графіки дозволяють зробити наступні висновки.

**Висновок.** Похибка вимірювання температури будівельної конструкції за

абсолютною величиною не перевищує десятих часток міліметра. Проте, при послідовному встановленні конструкцій ця похибка, як і будь-яка інша має тенденцію до накопичення. В залежності від того за яким законом накопичуються похибки, їх сумарний вплив може мати різні значення. За результатами дослідження встановлено, що при відсутності кореляційних зв'язків між похибками вимірювання температури, сумарне максимальне допустиме значення похибки складе 5 мм. У випадку, коли між похибками за температуру всіх ланок розмірного ланцюга існують додатні кореляційні зв'язки, а температуру вимірювали при монтажі та визначенні номінального розміру з похибкою  $\pm 3^\circ$ , допустиме відхилення складе 18 мм. Так величина є надто суттєвою, щоб не звертати на неї уваги. Враховуючи той факт, що кореляційні зв'язки у більшості випадків невідомі, розрахунки варто вести для найгіршого варіанту, а отже температуру конструкцій доцільно вимірювати з точністю не нижче  $2^\circ$

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бородачев Н.А. Обоснования методики расчета допусков и ошибок размерных и кинематических цепей / Н.А. Бородачев // Ин-т машиноведения АН СССР. - М.; АН СССР, 1946. - 227 с.
2. Видуев Н.Г. Строительная метрология. Ч.1. / Н.Г. Видуев, С.П. Войтенко // К., КИСИ, 1968 – 122 с.
3. Видуев Н.Г. Строительная метрология. Ч.2. / Н.Г. Видуев, С.П. Войтенко // К., КИСИ, 1969 – 138 с.
4. Войтенко С.П. Методика расчета технологических допусков методом максимума-минимума / С.П. Войтенко // Инженерная геодезия, К., 1989, №32, С. 21-24.
5. Войтенко С.П. Расчет точности пространственного положения узлов сборных инженерных сооружений / С.П. Войтенко // Инженерная геодезия, К., 1972, № 10, С. 10-17.
6. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий / Б.Н Жуков // Новосибирск, СГГА, 2003. – 356 с.
7. Жуков Б.Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации / Б.Н Жуков // Новосибирск, СГГА, 2004. – 376 с.
8. Климов О.Д. Практикум по прикладной геодезии. Изыскания, проектирование и возведение инженерных сооружений / О.Д. Климов, В.В. Калугин, В.К. Писаренко // М., Недра, 1991. – 271 с.
9. РД 50-635-87 Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11.05.85 № 1556.
10. Сытник В.С. Основы расчета и анализа точности геодезических измерений в строительстве / В.С. Сытник // М., Стройиздат, 1974. – 192 с.
11. Чмчян Т.Т. Расчет точности геодезических работ в строительстве: Справочник / Т.Т. Чмчян // М., Недра, 1988. - 151 с
12. Шульц Р.В. Практична реалізація математичної моделі врахування впливу температурних деформацій конструкцій при зведенні інженерних споруд / Р.В. Шульц, В.К.



Чибіряков, О.П. Ісаєв, О.В. Адаменко, В.С. Стрілець // Вісник Донецького національного технічного університету. Серія Гірничо-геологічна. – 2013, №1 (18).

13. Шульц Р.В. Сучасний стан проблеми врахування впливу температурних деформацій будівельних конструкцій при виконанні геодезичних вимірювань / Р.В. Шульц, В.К. Чибіряков, О.П. Ісаєв, О.В. Адаменко, В.С. Стрілець // Інженерна геодезія. К., – 2013. – №59.

### АННОТАЦІЯ

В работе рассмотрены вопросы изучения влияния погрешностей измерения температуры строительных конструкций при выполнении геодезических работ. Рассмотрена элементарная модель линейного расширения строительной конструкции в виде стержня и выполнен расчет средних квадратических погрешностей в определении его длины вследствие неточного измерения температуры. Используя теорию размерных цепей выполнен расчет влияния погрешности измерения температуры при монтаже цепи, состоящей из 20 звеньев. Исследовано три модели корреляционных связей между звеньями цепи и определено влияние этих связей на погрешность замыкающего звена. Установлено, что при монтаже конструкции длиной 200 м из 20 звеньев, для обеспечения средней квадратичной погрешности замыкающего звена 5 мм достаточно выполнять измерения температуры конструкций со средней квадратической погрешностью  $\pm 2^\circ$ .

### SUMMARY

In paper considers the study of the influence of temperature measurement errors on building structures during geodetic work was considered. The elementary model of linear expansion of a building structure in the form of a rod is considered, and the calculation of the mean square errors in determining its length due to an inaccurate temperature measurement is performed. Using the theory of dimensional chains, the influence of the error in measuring temperature during the installation of a chain consisting of 20 links was calculated. Three models of correlation between links of a chain are investigated and the influence of these correlations on the error of the closing link is determined. It is established that when mounting a 200 m length from 20 links, to achieve the mean square error of the closing link of 5 mm, it is sufficient to perform structural temperature measurements with a mean square error of  $\pm 2^\circ$ .