

EDN: MDZRHL

УДК 528.48

**П. И. СОЛОВЕЙ, А. Н. ПЕРЕВАРЮХА, Т. В. МОРОЗОВА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ОСОБЕННОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ**

**Аннотация.** В статье приведены особенности геодезического мониторинга определения деформаций высоковольтных опор в стесненных условиях испытательного полигона. Выполнен анализ всех передовых современных технологий и приборов, применяемых при геодезическом мониторинге высотных сооружений башенного типа. Сделан вывод о том, что наименее затратным и наиболее эффективным при определении деформаций высоковольтных опор в процессе испытаний является дистанционный способ с применением безотражательных электронных тахеометров, а при их отсутствии угловой метод с применением точных оптических теодолитов. Детально рассмотрена методика, а также выполнен расчет точности предлагаемых методов. Опыт испытаний высоковольтных опор позволил установить, что применение GNSS-технологий невозможно, так уже на ранних стадиях испытаний опора может разрушиться, что приведет к повреждению дорогостоящих GPS-приемников.

**Ключевые слова:** геодезический мониторинг, деформации, методика измерений, высоковольтные опоры.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Проводимый на этапе испытаний геодезический мониторинг деформаций различных высотных сооружений, в том числе высоковольтных опор, позволяет выявить несоответствие расчетных параметров, заложенных при проектировании и реальных параметров, полученных в различных режимах нагрузок, поэтому проблема выбора малозатратных и эффективных методов геодезического мониторинга испытываемых сооружений является актуальной.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Вопросам геодезического мониторинга высотных сооружений в условиях испытаний посвящено относительно небольшое количество публикаций. Непосредственно обсуждаемой проблеме посвящены работы [1, 4, 5]. Но с момента публикаций этих работ прошло много лет. За истекший период появились новые приборы и технологии определения деформаций высотных сооружений. Выбор оптимальных методов и приборов для определения деформаций сооружений в условиях испытаний требует своего решения.

### **ЦЕЛИ**

Выполнить сравнительный анализ современных методов геодезического мониторинга деформаций высотных сооружений в условиях испытаний и на его основе выбрать наиболее малозатратные и эффективные технологии и приборы.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

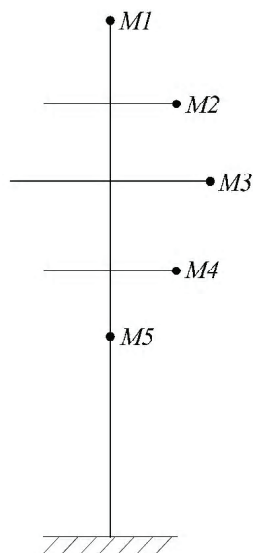
Геодезический мониторинг деформаций высотных сооружений башенного типа в условиях испытаний играет важную роль, так как позволяет выявить несоответствие расчетных параметров, заложенных при проектировании и реальных параметров, полученных в различных режимах нагрузок.

Рассмотрим особенности определения деформаций на примере испытаний высоковольтных опор в стесненных условиях испытательного полигона электросетевых конструкций.

© П. И. Соловей, А. Н. Переварюха, Т. В. Морозова, 2022



Испытательный полигон содержит: силовой пол и расположенную на нем испытываемую опору; двух силовых площадок с лебедками, предназначенных для задания статических и динамических нагрузок, моделирующих влияние ветра, гололеда, веса проводов и пр.; двух силовых башен (первая – аварийного режима, для удержания опоры от возможного опрокидывания, вторая – силовая башня нормального режима). Нагрузки, задаваемые лебедками, воспринимаются динамометрами, показания с которых по проводной сети передаются на пульт управления, расположенный на безопасном удалении от испытываемой опоры.



**Рисунок 1** – Схема расположения контрольных марок на опоре.

Перед испытаниями на опоре закрепляют контрольные марки в виде металлического стержня, на одном конце которого приварен шарик диаметром 20 мм, а другой конец стержня приварен к опоре. Контрольные марки закрепляют на вершине опоры (рис. 1), на концах траверс и в местах возможных слабых конструктивных узлов.

Количество контрольных марок может достигать от 3 до 7 штук в зависимости от конструктивных особенностей опоры и программы испытаний.

Испытания проводят в несколько этапов, приуроченных, как правило, к задаваемым усилиям в 20, 40, 60, 80, 100 % от общей нагрузки. Иногда, по требованию заказчика, усилия задают до разрушения опоры.

После каждого приложения нагрузки требуется определять пространственные координаты контрольных марок в условной системе координат.

Согласно техническим условиям на проведение испытаний высотных сооружений точность определения деформаций выражается зависимостью:

$$m = 0,01Q, \quad (1)$$

где  $Q$  – величина деформации, которая на разных этапах может изменяться от 200 до 700 и более миллиметров, что соответствует точности от 2 до 7 и более миллиметров.

Такую точность определения деформаций на первых этапах испытаний обеспечить очень сложно, особенно в стесненных условиях испытательного полигона и при воздействии на опору различных негативных внешних факторов (солнечный нагрев, ветер, темное время суток, вертикальная и горизонтальная рефракция, турбулентность воздуха и др.).

Точность определения деформаций испытываемых опор во многом зависит от применяемых методов и приборов. Анализ современных методов геодезического мониторинга деформаций высотных сооружений башенного типа показывает, что основными из них являются:

1. GNSS-технологии.
2. Лазерные сканеры.
3. Моторизованные электронные тахеометры.
4. Высокоточные инклинометры.
5. Безотражательные электронные тахеометры.
6. Угловые измерения оптическими теодолитами.
7. Наклонное проектирование оптическими теодолитами.

Каждый из методов достаточно хорошо освещен в работах [1, 2 3]. Рассмотрим возможность использования каждого из методов при геодезическом мониторинге деформаций опор ЛЭП применительно к стесненным условиям испытательного полигона.

1. Применение GNSS-технологий требует закрепления GPS-приемников (3–7 штук) в контрольных точках и базового приемника – на открытой местности и безопасном удалении от испытываемой опоры. В процессе испытаний, уже на первом – втором этапах может произойти разрушение опоры, что приведет к повреждению GPS-приемников. Таким образом применять GNSS-технологии при испытаниях высотных сооружений, в том числе высоковольтных опор, нельзя.

2. Применение лазерных сканеров также невозможно из-за специфики процесса испытаний высоковольтных опор, которая состоит в том, что после каждого этапа испытаний дается всего несколько минут на определение деформаций, что явно недостаточно для выполнения сканирования.

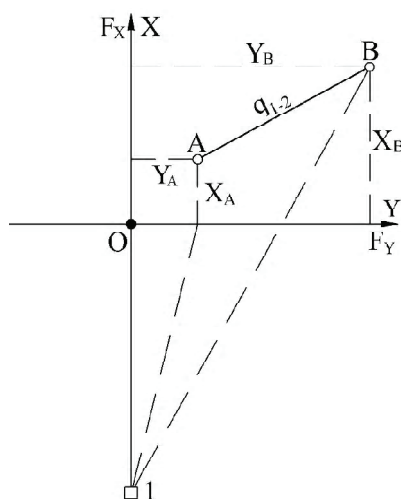
3. Моторизованные электронные тахеометры могут найти применение при испытаниях высотных сооружений. Однако высокая стоимость сдерживает их применение при геодезическом мониторинге деформаций высотных сооружений.

4. Применение высокоточных инклинометров при испытаниях высоковольтных опор также невозможно, так как опора претерпевает значительные деформации, приводящие к недопустимым наклонам и изгибам ее вертикальной оси, а иногда к разрушению уже на начальных этапах испытаний.

5. Безотражательные электронные тахеометры могут найти широкое применение при геодезическом мониторинге деформаций высотных сооружений, в том числе высоковольтных опор, в процессе испытаний.

Методика определения деформаций проста и заключается в следующем.

Безотражательный электронный тахеометр устанавливают на безопасном расстоянии от опоры (не менее высоты опоры) на оси  $X$  (рис. 2) в точке 1. До начала испытаний измеряют расстояние  $S = 1 - O$  до центра опоры. Визируют на контрольную точку  $A$  и в режиме «координаты» определяют ее координаты  $X_A, Y_A, Z_A$  в условной системе координат. За начало координат принят центр опоры. За оси  $X$  и  $Y$  – линии, совпадающие с направлениями прилагаемых нагрузок  $F_X$  и  $F_Y$ . Ось  $Z$  проходит через  $O$  и совпадает с вертикальной осью опоры.



**Рисунок 2** – Схема определения деформаций испытуемой опоры безотражательным электронным тахеометром.

После первого этапа (приложение к опоре 20 % нагрузки). Визируют на контрольную марку, сместившуюся в точку  $B$ , и в режиме «координаты» определяют координаты точки  $X_B, Y_B, Z_B$  и т. д.

Аналогично определяют координаты остальных контрольных марок.

Определение деформаций контрольных марок основано на полярном способе, поэтому их точность будет зависеть от погрешностей измерения углов и расстояний.

Среднюю квадратическую погрешность определения деформаций полярным способом можно описать формулой:

$$m_Q = \sqrt{m_S^2 + \left(\frac{m_\epsilon \cdot S}{c}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $m_\beta, m_S$  – средняя квадратическая погрешность измерения углов и расстояний, соответственно;

$S$  – расстояние от тахеометра до опоры.

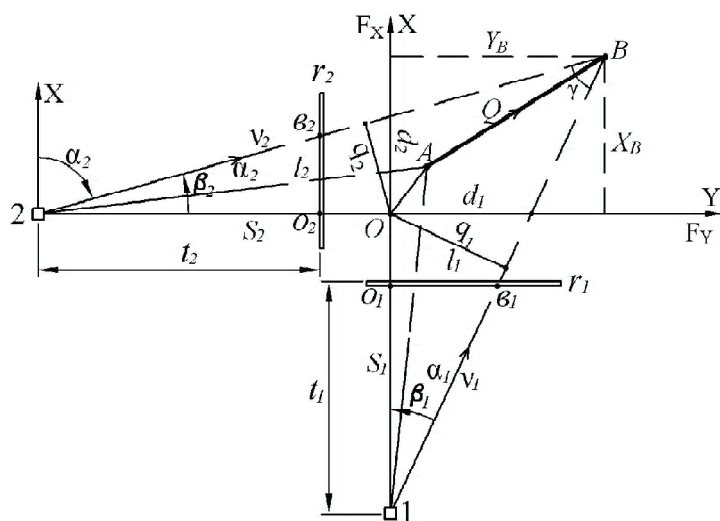
Если определение деформаций выполнять электронным тахеометром с погрешностью измерения углов  $m_\beta = \pm 5''$  и расстояний  $m_S = 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$ , то при  $S = 100 \text{ м}$  по формуле (2) получим  $m_Q = 3,2 \text{ мм}$ .

При  $Q = 700 \text{ мм}$  относительная погрешность составит  $1/218$ , что в 2 раза меньше требуемой точности ( $1/100$ ).

По окончании испытаний строят графики перемещений контрольных марок, величины перемещений в плане и по высоте.

6. Угловые измерения деформаций опор в условиях испытаний выполняют двумя оптическими теодолитами типа  $T5, T2$ , устанавливаемыми на двух взаимно перпендикулярных направлениях,

совпадающими с направлениями прилагаемых нагрузок  $F_X$  и  $F_Y$ , в точках 1 и 2 на безопасном расстоянии от испытываемой опоры (рис. 3).



**Рисунок 3** – Схема измерения деформаций опор оптическими теодолитами угловым методом и методом наклонного проектирования.

Пусть контрольная марка до начала испытаний занимает положение  $A$ . Под действием прилагаемых нагрузок контрольная марка перемещается в положение  $B$ . Требуется определить пространственные координаты точек  $A$  и  $B$ . Координаты точки  $A$  определяют угловым методом до начала испытаний. Покажем технологию определения пространственных координат на примере точки  $B$ .

Одновременно двумя теодолитами из точек 1 и 2 визируют на точку  $B$  и измеряют углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Вычисляют составляющие смещения  $OB$   $q_1$  и  $q_2$  по формулам:

$$q_1 = S_1 \cdot \sin \beta_1; \quad q_2 = S_2 \cdot \sin \beta_2, \quad (3)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – расстояния от теодолитов до центра опоры (точка  $O$ ), измеренные до начала испытаний.

В условной системе координат  $XOZ$ , оси которой совпадают с направлениями прилагаемых нагрузок  $F_X$  и  $F_Y$ , вычисляют дирекционные углы направлений 1 –  $B$ , 2 –  $B$  и угол засечки  $\gamma$  по формулам:

$$\alpha_1 = \beta_1; \quad \alpha_2 = 90^\circ - \beta_2; \quad \gamma = \alpha_2 - \alpha_1, \quad (4)$$

а также координаты точки  $B$  и деформацию  $Q$ :

$$\left. \begin{aligned} X_B &= \frac{q_1 \cdot \cos \alpha_2 - q_2 \cdot \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \\ Y_B &= \frac{q_1 \cdot \sin \beta_2 - q_2 \cdot \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{q_1^2 + q_2^2 - 2q_1q_2 \cos \gamma}. \quad (6)$$

Высотное положение точки  $B$  определяют тригонометрическим нивелированием по известным формулам.

По вычисленным координатам точек  $A$  и  $B$  определяют деформации  $Q = AB$ , которые представляют для анализа на пульт управления испытаний.

Расчет точности, выполненный по методике [2], показал, что погрешность определения деформаций опор в процессе испытаний оптическими теодолитами типа Т5 и при расстояниях от теодолитов до опоры  $S_i = 100$  м составляет 3,5 мм, что в относительной мере (при  $Q = 700$  м) равно  $1/200$  и не превышает нормативных требований ( $1/100$ ).

Следует отметить, что некоторые контрольные марки могут располагаться от вертикальной оси опоры на значительном расстоянии, достигающем 3...5 и более метров, например марка М3 (рис. 1). Из всех контрольных марок только марка М1 расположена на минимальном расстоянии от вертикальной оси опоры или совпадает с ней, а под действием максимальных нагрузок она смещается от первоначального положения до 700...1 000 мм.

В некоторых работах [1] при определении деформаций с двух взаимно-перпендикулярных направлений предлагается использовать приближенную формулу:

$$Q' = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}, \quad (7)$$

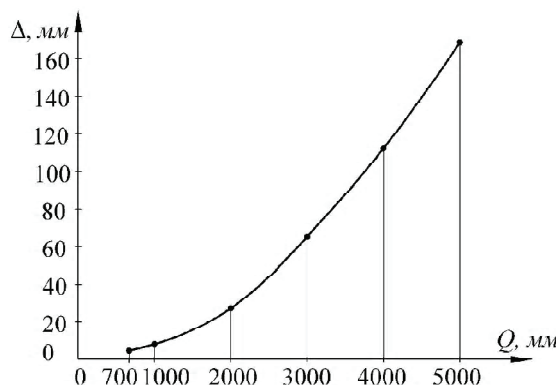
что приводит к значительным методическим погрешностям [3], превышающим требования нормативных документов.

Вычислим методическую погрешность для условий:  $Q = 700 - 5\,000$  мм,  $S = 100$  м. Результаты вычислений представлены в таблице.

**Таблица** – Вычисление методической погрешности

| № п/п | Составляющие общей деформации, мм |       | По строгой формуле (6), мм | Приближенная формула (7), мм | Методическая погрешность $\Delta = Q' - Q$ , мм |
|-------|-----------------------------------|-------|----------------------------|------------------------------|---|
|       | $q_1$                             | $q_2$ |                            |                              |   |
| 1     | 492                               | 492   | 700                        | 696                          | 4   |
| 2     | 702                               | 702   | 1 000                      | 993                          | 7   |
| 3     | 1 394                             | 1 394 | 2 000                      | 1 971                        | 29  |
| 4     | 2 077                             | 2 027 | 3 000                      | 2 937                        | 63  |
| 5     | 2 750                             | 2 750 | 4 000                      | 3 889                        | 111   |
| 6     | 3 418                             | 3 418 | 5 000                      | 4 834                        | 166   |

По результатам вычислений построен график (рис. 4) зависимости методической погрешности от величины деформации (расстояния)  $Q$ .



**Рисунок 4** – График зависимости методической погрешности  $\Delta$  от величины деформации (расстояния)  $Q$ .

Анализ таблицы и графика (рис. 4) показывает, что методическая погрешность вычисления деформаций по приближенной формуле (7) достигает значительных величин, превышающих нормативный допуск ( $0,01Q$ ). Совместное действие методической погрешности и погрешностей, вызванных влиянием различных внешних факторов еще больше снижает точность определения деформаций опор в условиях испытаний. Поэтому координаты контрольных марок и их деформации следует вычислять по строгим формулам (5), (6).

7. Геодезический мониторинг деформаций опор в процессе испытаний способом наклонного проектирования заключается в следующем.

У основания опоры устанавливают нивелирные рейки  $r_1$  и  $r_2$  (рис. 3). Одновременно визируют двумя теодолитами на точку  $O$  (центр опоры), проектируют ее на рейку и берут отсчеты  $o_1$  и  $o_2$ . После этого визируют на контрольную марку (например  $B$ ), проектируют ее на рейки и берут отсчеты  $v_1$  и  $v_2$ .

Вычисляют разность отсчетов:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= e_1 - o_1; \\ l_2 &= e_2 - o_2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Вычисляют приведенные к центру  $O$  опоры отсчеты:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \frac{S_1 - t_1}{l_1}; \\ d_2 &= \frac{S_2 - t_2}{l_2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Вычисляют параллактические углы между направлениями  $1 - B$  и  $1 - O$ , а также  $2 - B$  и  $2 - O$ :

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \arctg \frac{d_1}{S_1}; \\ \beta_2 &= \arctg \frac{d_2}{S_2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Вычисляют дирекционные углы и координаты контрольных марок по формулам (4) и (5). Деформации  $Q$  опор вычисляют по формулам (6).

Погрешность определения деформаций опор способом наклонного проектирования зависит в основном от погрешностей визирования на контрольные марки  $m_e$ , наклонного проектирования марок на нивелирные рейки  $m_{\Pi}$  и отсчитывания по рейкам  $m_o$ .

Применив принцип равных влияний, т. е.:

$$m = m_e + m_{\Pi} + m_o = 2,5 \text{ мм},$$

погрешность определения деформаций после некоторых преобразований составит:

$$m_Q = m\sqrt{10} = 2,5\sqrt{10} = 7,9 \text{ мм},$$

что в 2,2 раза грубее способа углов. Кроме того, трудоемкость способа наклонного проектирования выше в 2–3 раза по сравнению со способом углов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ перечисленных методов определения деформаций опор в процессе испытаний показывает, что наиболее эффективным, точным и относительно малозатратным является метод с использованием безотражательного электронного тахеометра. При отсутствии электронного тахеометра достаточно точным и эффективным при определении деформаций высотных сооружений в условиях испытаний является способ угловых измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков, А. А. Комплексный подход к исследованию деформаций высотных опор ЛЭП в условиях испытаний и эксплуатации : специальность 05.24.01 «Геодезия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Анненков Андрей Александрович ; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макеевка, 2003. – 18 с. – Место защиты : Киевский национальный университет строительства и архитектуры. – Текст : непосредственный.
2. Баран, П. И. Определение крена дымовых труб с изолированных опорных пунктов / П. И. Баран, П. И. Соловей. – Текст : непосредственный // Геодезические работы на подрабатываемых территориях : сборник научных трудов – Москва : [б. и.], 1987. – С. 81–85.
3. Соловей, П. И. Исследование точности определения величины и направления крена дымовых труб с двух изолированных пунктов. – Текст : непосредственный / П. И. Соловей // Совершенствование геодезических и фотограмметрических работ : сборник научных трудов. – Москва : [б. и.], 1990. – С. 93–97.
4. High Accuracy Real-time Dam Monitoring Using Low-Cost GPS Equipment / R. Ali, P. Cross, A. Ali El-Sharkawi, United Kingdom. – Текст : непосредственный // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 43 – Deformation Measurement and Analysis, April 16–21 2005, Cairo, Egypt. – Egypt : [et al.], 2005. – P. 1–20.

5. Baraka, M. A. Monitoring Bridge Deformations During Static Loading Tests Using GPS / M. A. Baraka, E. H. El-Shazly. – Текст : непосредственный // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 40 – Deformation Measurement and Analysis, April 16–21 2005, Cairo, Egypt. – Egypt : [et al.], 2005. – P. 1–10.

Получена 24.10.2022

Принята 25.11.2022

П. І. СОЛОВЕЙ, А. М. ПЕРЕВАРЮХА, Т. В. МОРОЗОВА  
ОСОБЛИВОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ  
ВИСОТНИХ СПОРУД В УМОВАХ ВИПРОБУВАНЬ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті наведено особливості геодезичного моніторингу визначення деформацій високовольтних опор у стиснених умовах випробувального полігону. Виконано аналіз усіх передових сучасних технологій та приладів, які застосовуються при геодезичному моніторингу висотних споруд баштового типу. Зроблено висновок про те, що найменш витратним і найбільш ефективним при визначенні деформацій високовольтних опор у процесі випробувань є дистанційний спосіб із застосуванням безвідбивних електронних тахеометрів, а за їх відсутності кутівий метод із застосуванням точних оптичних теодолітів. Детально розглянуто методику, а також виконано розрахунок точності запропонованих методів. Досвід випробувань високовольтних опор дозволив встановити, що застосування GNSS-технологій неможливо, так вже на ранніх стадіях випробувань опора може зруйнуватися, що призведе до пошкодження дорогих GPS-приймачів.

**Ключові слова:** геодезичний моніторинг, деформація, методика вимірювань, високовольтні опори.

PAVEL SOLOVEJ, ANATOLY PEREVARJUKA, TATYANA MOROZOVA  
FEATURES OF GEODETIC MONITORING OF DEFORMATIONS OF HIGH-  
RISE STRUCTURES UNDER TEST CONDITIONS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article presents the features of geodetic monitoring for determining the deformations of transmission towers in the tight working space of the test site. The analysis of all advanced modern technologies and instruments used in geodetic monitoring of high-tension transmission tower has been carried out. It is concluded that the least expensive and most effective in determining the deformations of transmission towers during testing is the remote method with the use of reflectorless electronic total stations, and in the absence thereof, the angular method with the use of precision optical theodolites. The technique is considered in detail, and the accuracy calculation of the proposed methods is also performed. The experience of transmission towers testing has shown that the use of GNSS technologies is impossible, since the tower can collapse already in the early stages of testing that will lead to the damage of expensive GPS receivers.

**Key words:** geodetic monitoring, deformations, measurement technique, transmission towers.

**Соловей Павел Илларионович** – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций высотных зданий и сооружений.

**Переварюха Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой инженерной геодезии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций колеблющихся и вращающихся объектов.

**Морозова Татьяна Васильевна** – старший преподаватель кафедры инженерной геодезии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование сдвижений земной поверхности и деформаций зданий и сооружений под действием подземных горных работ.

**Соловей Павло Ларіонович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної геодезії ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження статичних і динамічних деформацій висотних будівель і споруд.

**Переварюха Анатолій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент; завідувач кафедри інженерної геодезії ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження статичних і динамічних деформацій коливних і обертових об'єктів.

**Морозова Тетяна Василівна** – старший викладач кафедри інженерної геодезії ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження зрушення земної поверхні та деформації будівель та споруд під впливом підземних гірничих робіт.

**Solovej Pavel** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Engineering Geodesy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of static and dynamic deformations of high-rise buildings and structures.

**Perevarjuha Anatoly** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Head of the Engineering Geodesy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of static and dynamic deformations of varying and rotating objects.

**Morozova Tatyana** – senior lecturer, Engineering Geodesy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of the earth surface movements and deformations of buildings and constructions under the influence of underground mining.