

УДК 528.48

**П. И. СОЛОВЕЙ, А. Н. ПЕРЕВАРЮХА, М. И. ЛОБОВ, Н. А. ПЕРЕВАРЮХА, А. С. ЕФИМЕНКО**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОВОДОВ ЛЭП ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ**

**Аннотация.** Выполнен расчет точности определения габарита проводов воздушных линий электропередачи, находящихся одновременно под воздействием различных внешних факторов. Установлено, что наибольшее одновременное влияние на точность измерений оказывают неточная проекция контролируемой точки провода на пересекаемый объект, неперпендикулярность визирной оси прибора к продольной оси ЛЭП, приборные погрешности. Определены параметры методики измерений, при которой влияние различных внешних факторов не превышает допустимых величин.

**Ключевые слова:** геодезический мониторинг, расчет точности, габарит проводов.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Недопустимый габарит проводов воздушных линий электропередачи может привести к тяжелым авариям, поэтому получение точных данных о пространственном положении проводов, особенно в сложных условиях измерений, при одновременном воздействии нескольких негативных факторов является актуальной задачей.

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

До настоящего времени основное внимание в публикациях уделялось в основном вопросам геодезических изысканий ЛЭП [4, 5], но очень мало публикаций посвящено геодезическому мониторингу проводов, находящихся в сложных условиях измерений при одновременном воздействии нескольких внешних факторов.

### **ЦЕЛИ**

Целью статьи является расчет точности определения габарита проводов при раздельном и совместном влиянии нескольких негативных факторов.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

При пересечении воздушных линий электропередачи через различные объекты (железные и автомобильные дороги, реки, трубопроводы, линии связи и др.) выполняют геодезический мониторинг габаритов проводов. Очень часто мониторинг выполняют при воздействии различных внешних факторов. Наибольшее влияние на точность измерения габаритов проводов оказывают следующие факторы:

1. Фактор  $Z$  – неточная проекция контролируемой точки провода на пересекаемый объект.
2. Фактор  $\alpha$  – неперпендикулярность визирной оси зрительной трубы прибора к продольной оси ЛЭП.
3. Фактор  $P$  – влияние приборных погрешностей.
4. Фактор  $t$  – вертикальное перемещение проводов под воздействием солнечного нагрева.
5. Фактор  $V$  – отклонение провода при боковом воздействии ветра.
6. Фактор  $r$  – вертикальное перемещение проводов при гололеде.

Очень редко все перечисленные факторы оказывают совместное влияние на точность определения габаритов проводов. Наиболее часто при геодезическом мониторинге оказывают совместное влияние факторы  $Z$ ,  $\alpha$  и  $\Pi$ . Фактор  $t$  не будет оказывать влияние на точность контроля габарита, если при визировании на контролируемую точку провода будет тратиться время, при котором провод не будет перемещаться по отвесной линии. Но на предельное перемещение провода  $t$  – фактор оказывает значительное влияние и его необходимо учитывать.

Фактор  $V$  оказывает значительное влияние на точность измерений, поэтому при сильном боковом ветре геодезический мониторинг нужно прекращать.

Фактор  $r$  не оказывает заметного влияния на точность измерений при условии, что за время контроля провода условия измерений не поменяются, т. е., гололед уменьшится или увеличится.

Рассмотрим влияние каждого из факторов  $Z$ ,  $\alpha$  и  $\Pi$ , которые наиболее часто оказывают совместное влияние на точность измерений.

Пусть провод  $P$  (рис. 1) ЛЭП пересекается с железной дорогой  $XX_1$ . Требуется определить габарит  $G$  – расстояние между точкой  $P$  провода и точкой  $T$  рельса, расположенных на одной отвесной линии  $ZZ_1$ .

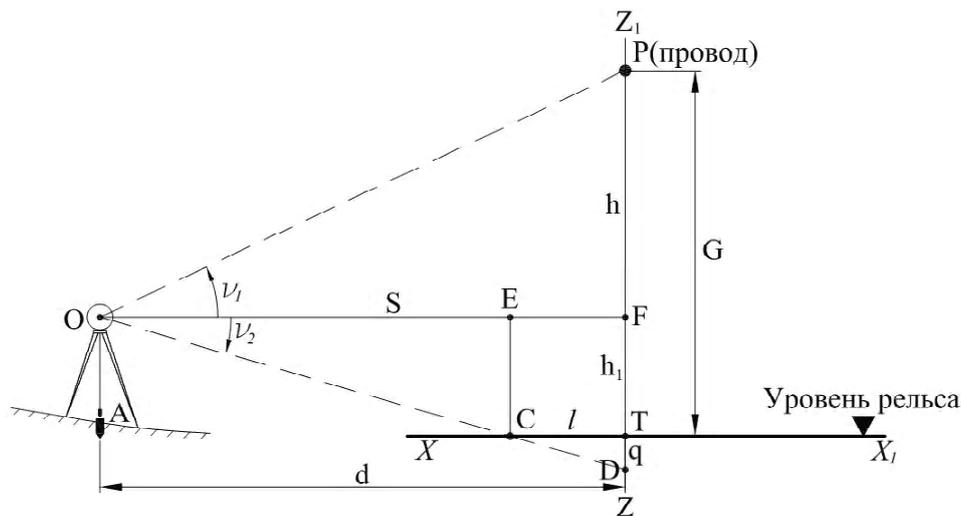


Рисунок 1 – Схема влияния  $Z$  – фактора на точность определения габарита проводов ЛЭП.

При традиционном методе [2] оптический теодолит устанавливают в точке  $A$  на линии  $AT$ , перпендикулярной направлению ЛЭП. Горизонтальное расстояние  $d$  от теодолита до точки  $T$  назначают не меньшим габарита  $G$ . Визируют на точки  $P$  и  $T$ , измеряют углы наклона  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , расстояние  $d$  и по формулам тригонометрического нивелирования вычисляют габарит провода  $G = PT$ .

Пусть на некотором расстоянии  $l$  от точки  $T$  зафиксирована точка  $C$ , которая не будет совпадать с отвесной линией  $ZZ_1$ , проходящей через точку  $P$  провода. Возникнет влияние фактора  $Z$  на точность измерения габарита  $G$  провода.

При визировании теодолита на точку  $C$  габарит увеличится или уменьшится на величину  $q$ . Положительное или отрицательное значение параметра  $q$  зависит от места фиксации точки  $C$  – слева или справа от отвесной линии  $ZZ_1$  (рис. 1). Из подобия треугольников  $OEC$  и  $STD$  получим выражение:

$$h/S = q/l, \quad (1)$$

из которого:

$$q = \frac{h \cdot l}{S}. \quad (2)$$

Для оценки точности измерения габарита продифференцируем выражение (2) и, перейдя к средним квадратическим погрешностям, получим:

$$m_q = \sqrt{\left(\frac{h}{S} m_l\right)^2 + \left(\frac{l}{S} m_h\right)^2 + \left(\frac{hl}{S^2} m_S\right)^2}. \quad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что второй и третий члены в подкоренном выражении значительно меньше первого члена. Тогда из формулы (3) можно записать:

$$m_q = \frac{h}{3} m_l. \quad (4)$$

Рассмотрим, при каком максимальном расстоянии  $l$  погрешность измерения габарита провода не превысит предельно допустимое значение, которое согласно [2] составляет  $m_G = 150$  мм.

Из (4) будем иметь:

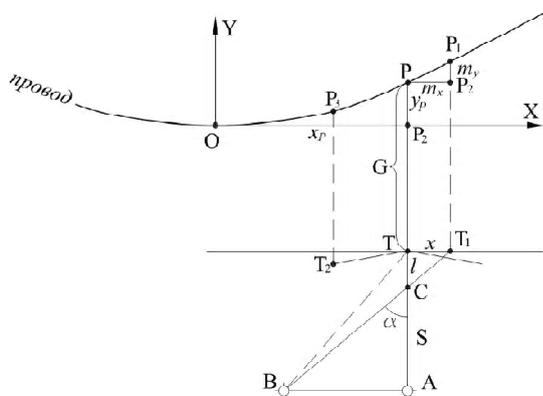
$$m_l = \frac{m_q S}{h}. \quad (5)$$

При  $S = 30$  м,  $h = 3$  м,  $m_h = m_G = 150$  мм по формуле (5) получим:

$$m_l = \frac{150 \cdot 30}{3} = 1500 \text{ мм} = 1,5 \text{ м}.$$

Зафиксировать точку  $T$  на отвесной линии  $ZZ_1$  «на глаз» очень сложно с такой точностью, поэтому требуются дополнительные измерения с применением теодолита.

Рассмотрим влияние неперпендикулярности визирной оси зрительной трубы теодолита (фактор  $\alpha$ ) на точность определения габарита провода ЛЭП, пересекающейся, например, с точкой  $P$  провода (рис. 2).



**Рисунок 2** – Схема влияния  $\alpha$ - фактора на точность определения габарита провода.

Требуется определить габарит  $G = PT$  провода. С этой целью теодолит устанавливают в точке  $A$  на линии  $AT$ , перпендикулярной продольной оси  $X$  линии электропередачи на расстоянии  $S < (G : 2G)$ . Очень часто установить теодолит в точке  $A$  на проезжей части автодороги не представляется возможным по технике безопасности из-за интенсивного движения автомобиля. Поэтому прибор устанавливают вне проезжей части (например на обочине) на линии  $BT$  под некоторым углом  $\alpha$  к линии  $AT$ . При визировании из точки  $B$  на  $T$  точка  $P$  провода будет находиться в коллимационной плоскости теодолита и влияние фактора  $\alpha$  на точность измерений габарита не возникает.

Предположим, что вместо точки  $T$  зафиксирована точка  $C$ , расположенная на некотором расстоянии  $l$ . В этом случае при визировании на точку  $C$  из точки  $B$

коллимационная плоскость теодолита отсечет на проводе отрезок  $PP_1$ , что приведет к возникновению погрешности  $m_y = P_1P_2$  в измерении габарита.

Погрешность  $m_y$  будет тем больше, чем круче линия провода, т. е., чем ближе точка  $T$  пересекаемого объекта (автомобильная дорога) будет расположена к одной из ближайших опор ЛЭП.

Для пролетов ЛЭП меньше 800 метров кривую провисания провода рекомендуется [1] в прямоугольной системе координат описывать уравнением квадратичной параболы:

$$y = ax^2, \quad (6)$$

где  $a = \gamma / 2\sigma$ ;  $\gamma$  – удельный вес единицы длины провода;

$\sigma$  – горизонтальная составляющая силы натяжения провода;

$x = x_p$  – расстояние от начала координат до точки  $P'$ .

Для определения предельной погрешности, вызванной влиянием  $\alpha$ -фактора на точность измерения габарита провода продифференцируем выражение (6) и, перейдя к средним квадратическим погрешностям, получим:

$$m_y = 2axm_x = 2 \frac{\gamma}{2\sigma} xm_x = \frac{\gamma}{\sigma} xm_x. \quad (7)$$

Пусть в пролете длиной  $l = 350$  м контролируемая точка  $P$  расположена на расстоянии  $x_p = 150$  м от точки  $O$  (низшая точка кривой провисания провода). Подставив  $\gamma = 3,46 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma = 13,00 \text{ даН/мм}^2$  (взято из работы [1]),  $m_x = 1$  м в формулу (7), получим:

$$m_y = \frac{\gamma}{\sigma} x m_x = \frac{3,46 \cdot 10^{-3} \cdot 150 \cdot 1}{13,00} = 0,040 \text{ м,}$$

что в 3,75 раза меньше предельной погрешности  $m_G = 0,150$  м согласно [2].

При больших пролетах погрешность  $m_y$  будет значительно больше. Например, в пролете длиной  $l = 1\,400$  м, при  $x = 650$  м,  $m_x = 1$  м,  $\gamma = 4,84 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma = 15,07 \text{ даН/мм}^2$  (взяты из работы [1]), по формуле (7) получим:

$$m_y = \frac{\gamma x m_x}{\sigma} = \frac{4,84 \cdot 10^{-3} \cdot 650 \cdot 1}{15,07} = 0,209 \text{ м,}$$

что в 1,4 раза превышает предельную погрешность (0,150 м) измерения габарита  $G$ .

При увеличении погрешности  $m_x$  соответственно будет увеличиваться  $m_y$ . Так, при  $m_x = 3$  м и тех же параметрах, что в предыдущем примере, из выражения (7) будем иметь:

$$m_y = \frac{4,84 \cdot 10^{-3} \cdot 650 \cdot 3}{15,07} = 0,627 \text{ м,}$$

что более чем в 4 раза превышает допустимое значение (0,150 м). Поэтому для исключения совместного влияния факторов  $Z$  и  $\alpha$  необходимо, чтобы точки  $T$  и  $P$  находились на одной отвесной линии  $ZZ_1$  (рис. 1).

Рассмотрим влияния приборных погрешностей (фактор  $\Pi$ ) на точность измерения габарита провода. По рекомендации [2] при определении габарита  $G$  провода (рис. 1) теодолит устанавливают на линии  $AT$ , перпендикулярной к продольной оси ЛЭП. Затем из точки  $A$  визируют на точки  $P$  и  $T$ , измеряют углы наклона  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , расстояние  $S$  и вычисляют габарит провода:

$$G = S(\operatorname{tg} \nu_1 + \operatorname{tg} \nu_2). \quad (8)$$

Для оценки точности измерения габарита  $G$ , вызванного влиянием  $\Pi$ -фактора, найдем частные производные функции (8) по  $S$ ,  $\nu_1$  и  $\nu_2$ :

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \operatorname{tg} \nu_1 + \operatorname{tg} \nu_2, \quad \frac{\partial G}{\partial \nu_1} = \frac{S}{\cos^2 \nu_1}, \quad \frac{\partial G}{\partial \nu_2} = \frac{S}{\cos^2 \nu_2}. \quad (9)$$

После некоторых упрощений предельная средняя квадратическая погрешность определения габарита будет иметь вид:

$$m_{\Pi} = \sqrt{m_s^2 (\operatorname{tg} \nu_1 + \operatorname{tg} \nu_2)^2 + \frac{S^2 m_v^2}{\rho^2} \left( \frac{1}{\cos^4 \nu_1} + \frac{1}{\cos^4 \nu_2} \right)}, \quad (10)$$

где  $m_s$ ,  $m_v$  – средние квадратические погрешности измерения расстояния  $S$  и углов наклона  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Пусть согласно [2] измерения выполняют техническим теодолитом 2Т30 со средней квадратической погрешностью измерения вертикальных углов  $m_v = 30''$ , а расстояний – нитяным дальномером с относительной погрешностью  $1/200$ . Примем  $S = 50$  м,  $\nu_1 = 30^\circ$ ,  $\nu_2 = 3^\circ$ ,  $m_s = S/200 = 50/200 = 0,25$  м = 250 мм. Подставив численные данные в формулу (10), получим:

$$m_{\Pi} = \sqrt{250^2 (\operatorname{tg} 30^\circ + \operatorname{tg} 3^\circ)^2 + \frac{(5 \cdot 10^5)^2 \cdot 30^2}{(2 \cdot 10^5)^2} \left( \frac{1}{\cos^4 30^\circ} + \frac{1}{\cos^4 3^\circ} \right)} = 201 \text{ мм,}$$

что превышает в 1,34 допустимое значение (150 мм) даже при условии, что другие факторы не будут оказывать влияние на точность измерений. Поэтому измерение углов следует выполнять более точными теодолитами, например типа Т5 ( $m_\beta = \pm 5''$ ), а расстояния механическими рулетками с относительной погрешностью  $1/2\,000$ . Подставив эти параметры в формулу (10), получим:

$$m_{\Pi} = \sqrt{25^2 (\operatorname{tg} 30^\circ + \operatorname{tg} 3^\circ)^2 + \frac{(5 \cdot 10^5)^2 \cdot 5^2}{(2 \cdot 10^5)^2} \left( \frac{1}{\cos^4 30^\circ} + \frac{1}{\cos^4 3^\circ} \right)} = 26 \text{ мм,}$$

что отвечает требованиям [2] и не превышает допустимого значения (150 мм).

Выше было рассмотрено раздельное влияние факторов  $Z$ ,  $\alpha$  и  $\Pi$  на точность определения габарита проводов. Рассмотрим совместное влияние этих факторов на точность измерений.

Известно [3], что общая погрешность определения габарита провода при одновременном влиянии трех перечисленных факторов  $Z$ ,  $\alpha$  и  $П$  будет иметь вид:

$$m_G = \sqrt{m_q^2 + m_y^2 + m_{II}^2}. \quad (11)$$

Приняв  $m_q = m_y + m_{II} = m$  (принцип равных влияний), из формулы (11) при подстановке тех же параметров получим:

$$m = \frac{m_G}{\sqrt{3}} = \frac{150}{\sqrt{3}} = 87 \text{ мм}. \quad (12)$$

Тогда из формулы (5) и (7) соответственно получим:

$$m_l = \frac{m_q S}{h} = \frac{87 \cdot 30}{3} \approx 1 \text{ м},$$

$$m_x = \frac{m_y \cdot \sigma}{\chi \cdot x} = \frac{87 \cdot 13}{3,46 \cdot 10^{-3} \cdot 150\,000} \approx 2 \text{ м},$$

что предъявляет еще более высокие требования к точности определения габарита проводов.

В заключении следует отметить, что при пересечении ЛЭП с автодорогами (особенно высших категорий) габарит у кромки (точка  $T_2$ ) дороги (рис. 2) может оказаться меньше габарита у оси дороги (точка  $T$ ), т. е.  $P_3 T_2 < PT$ , и это необходимо учитывать при геодезическом мониторинге проводов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередач [Текст] / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 312 с.
2. Руководство по инженерным изысканиям трасс воздушных линий электропередач 35–110 кВ [Текст] / Министерство топлива и энергетики Российской Федерации, Проектно-изыскательный и научно-исследовательский институт по проектированию энергетических систем и электрических сетей. – Москва : Энергосетьпроект, 1996. – 226 с.
3. Видуев, Г. Н. Математическая обработка геодезических измерений [Текст] : учебное пособие / Г. Н. Видуев, А. Г. Григоренко. – К. : Вища школа, 1978. – 376 с.
4. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам [Текст] / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук, В. Е. Новак [и др.]. – М. : Недра, 1980. – 781 с.
5. Справочник геодезиста [Текст] / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук, Г. В. Багратуни [и др.] ; под ред. В. Д. Большакова, Г. П. Левчука. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Недра, 1975. – 1056 с.

Получено 08.10.2017

П. І. СОЛОВЕЙ, А. М. ПЕРЕВАРЮХА, М. І. ЛОБОВ, Н. А. ПЕРЕВАРЮХА,  
А. С. ЄФИМЕНКО  
ГЕОДЕЗИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПРОВІДІВ ЛЕП ПРИ ВПЛИВІ РІЗНИХ  
ФАКТОРІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Виконано розрахунок точності визначення габариту проводів повітряних ліній електропередавання, які перебувають одночасно під впливом різних зовнішніх факторів. Встановлено, що найбільший одночасний вплив на точність вимірювань мають неточну проєкція контрольної точки проводу на об'єкт, який перетинається, неперпендикулярність візирної осі приладу до поздовжньої осі ЛЕП, похибки приладу. Визначено параметри методики вимірювань, при якій вплив різних зовнішніх факторів не перевищує допустимих величин.

**Ключові слова:** геодезичний моніторинг, розрахунок точності, габарит проводів.

PAVEL SOLOVEJ, ANATOLY PEREVARJUHA, MICHAIL LOBOV,  
NATALIA PEREVARJUHA, ANNA YEFYMENKO  
GEODETIC MONITORING OF POWER LINE WIRES UNDER THE INFLUENCE  
OF VARIOUS FACTORS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The accuracy of determining the overall dimensions of the wires of overhead power lines, which are simultaneously influenced by various external factors, is calculated. It is established that the greatest simultaneous influence on the accuracy of measurements is the inaccurate projection of the monitored wire point onto the crossed object, the non-perpendicularity of the instrument's sight line to the longitudinal axis of the transmission line, instrumental errors. The parameters of the measurement procedure are determined, under which the influence of various external factors does not exceed the permissible values.

**Key words:** geodetic monitoring, accuracy calculation, wire gauge.

**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 кафедры инженерной геодезии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование статических и динамических деформаций колеблющихся и вращающихся объектов.

**Лобов Михаил Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геодезии ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: комплексные геодезические исследования деформаций высотных сооружений башенного типа.

**Переварюха Наталия Анатольевна** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: развитие общей методики динамических расчетов элементов строительных конструкций и поиск рациональных способов гашения колебаний.

**Ефименко Анна Сергеевна** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: сравнительный анализ сметной стоимости при монтаже высотных сооружений.

**Соловей Павло Ілларіонович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної геодезії ДОНУ 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 кафедри інженерної геодезії ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження статичних і динамічних деформацій коливних і обертових об'єктів.

**Лобов Михайло Іванович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної геодезії ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: комплексні геодезичні дослідження деформацій висотних споруд баштового типу.

**Переварюха Наталія Анатоліївна** – магістрант ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розвиток загальної методики динамічних розрахунків елементів будівельних конструкцій та пошук раціональних способів гашення коливальних.

**Єфименко Анна Сергіївна** – магістрант ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: порівняльний аналіз кошторисної вартості при монтажі висотних споруд.

**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.

**Perevarjuha Anatoly** – 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 varying and rotating objects.

**Lobov Michail** – D. Sc. (Eng.), a Professor, the Head of the Engineering Geodesy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: complex geodetic researches of deformations of high-altitude constructions of tower type.

**Perevarjuha Natalia** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of the general dynamic design technique of building structure elements and search for the rational ways of vibration damping.

**Yefymenko Anna** – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: comparative analysis of the estimated cost for the installation of high-rise buildings.