

В. С. ШИРОКОВ  
А. С. ЛЕОНЕНКО

## ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ МОНТАЖА И КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ФУНДАМЕНТА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЬНЫХ ПРОЖЕКТОРНЫХ ОПОР

### INFLUENCE OF ASSEMBLY DEFECTS AND FOUNDATION CONSTRUCTION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF STEEL LIGHTING MASTS

Рассмотрен опыт моделирования прожекторных мачт в расчетном комплексе с учетом различных факторов. Предметом исследования является влияние учета свайного основания и дефектов монтажа в виде крена на напряженно-деформированное состояние мачты. В рамках исследования рассмотрено четыре расчетные схемы прожекторной мачты серийного изготовления: М1 – без крена и без учета свай; М2 – без крена со сваями длиной 12 м; М3 – с креном и сваями 12 м; М4 – с креном и сваями 16 м. По результатам исследования установлено, что учет дефектов монтажа не оказывает значительного влияния на напряженно-деформированное состояние мачт. Учет совместной работы свай с надземными конструкциями позволяет более точно определить напряженно-деформированное состояние мачт. При этом расчетные перемещения могут быть более чем в два раза выше, чем для мачт, рассчитываемых без учета свайного основания. Также учет свайного основания приводит к уменьшению собственных частот колебаний мачт, в результате чего увеличивается пульсационная составляющая ветровой нагрузки, а следовательно, и максимальные усилия в элементах конструкции.

**Ключевые слова:** стальная мачта, напряженно-деформированное состояние, частота собственных колебаний, дефект, крен, свайный фундамент

#### Введение

Стальные прожекторные мачты используются повсеместно для обеспечения освещения объектов различного назначения. При этом они еще выполняют роль молниеотводов. Строго говоря, по конструктивному исполнению их следует называть башнями [1]. Однако, в данной статье принято название «мачта».

На напряженно-деформированное состояние прожекторных мачт влияют высота, форма

The experience of modeling lighting masts in the FEM complex taking into account various factors is considered. The subject of the paper is the study of the influence of taking into account the pile foundation and installation defects in the form of a roll on the stress-strain behavior of the mast. The study considered four calculation schemes for a mass-produced lighting mast: M1 – no slant and no piles; M2 – 12 m long pile, no slant; M3 – 12 m long pile and a slant; M4 – 16 m piles and a slant. The results of the study showed that taking into account installation defects does not have a significant effect on the stress-strain behavior of the masts. Taking into account the joint work of piles with steel structures allows for a more accurate determination of the stress-strain behavior of the masts. At the same time, the calculated displacements can be more than 2 times higher than for masts calculated without taking into account the pile foundation. Also, taking into account the pile foundation leads to a decrease in the natural vibration frequencies of the masts, due to which the pulsation component of the wind load increases, and, consequently, the maximum forces in the elements of the structure.

**Keywords:** steel mast, stress-strain behavior, natural vibration frequency, defect, slant, pile foundation

и габариты в плане, тип решетки [2–4]. Основным воздействием на подобные сооружения является ветровое [5–8]. При этом в реальных условиях эксплуатации на НДС мачт влияют различные дефекты и повреждения, возникающие в процессе монтажа и эксплуатации [9]. Наиболее распространенным дефектом монтажа стальных башенных сооружений является их крен [10–12].

В настоящее время в нормативной литературе рекомендуется составлять расчетные схемы системы «сооружение-фундамент-основание»,

т. е. учитывать влияние фундамента и грунтов на напряженно-деформированное состояние надземных конструкций. Учет фундаментов в расчетной схеме может оказывать значительное влияние на работу вышележащих конструкций, например на частоты собственных колебаний сооружения [13, 14], что в свою очередь влияет на усилия от пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Объектом исследования являются стальные четырехгранные прожекторные мачты с треугольной решеткой.

Предметом исследования является изучение влияния учета свайного основания и дефектов монтажа в виде крена на напряженно-деформированное состояние мачты.

### Материалы и методы

Для исследования приняты две существующие мачты освещения М3 и М4, выполненные по серии 3.407.9-172 «Прожекторные мачты и отдельно стоящие молниеотводы». Высота мачты до молниеотвода составляет 32,050 м, вместе с молниеотводом 37,050 м. Размеры в плане мачты у основания 3,01×3,01 м, на отметке +5.300 размеры 2,46×2,46 м, на отметке +17.000 размеры 1,246×1,246 м, на отметке +28.700 размеры 1,05×1,05 м.

Марки сборочных элементов мачты:

- нижний ярус (от отм. +0.200 до отм. +5.300) марка ТС-36;
- второй ярус (от отм. +5.300 до отм. +17.000) марка ТС-37;
- третий ярус (от отм. +17.000 до отм. +28.700) марка ТС-38;
- тросостойка (от отм. +29.300 до отм. +32.050) марка ТС-4.

При расчете мачт учтено их отклонение от вертикали, определенное в рамках обследования (рис. 1). Отклонение мачт от вертикали смоделировано как общий крен сооружения. Также для сравнения результатов выполнен расчет мачты М2 без отклонений.

Основанием под мачты служат суглинки коричневого цвета, мягкопластичной консистенции с линзами, текучепластичные и суглинки коричневого цвета, тугопластичные. Фундаменты мачт свайные по серии 1.011.1-10 в.1 «Сваи цельные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой». Под мачтой М3 устроено 8 свай С120.30, под мачтой М4 – 8 свай С160.30.

Расчет моделей мачт произведен при помощи ПК «Лира-САПР». Расчетные схемы включали в себя надземную часть мачты и сваи. Элементы мачты смоделированы КЭ10, элементы свай смоделированы КЭ57 (рис. 2). При расчете свай учтено их взаимное влияние. Также для сравнения результатов выполнен расчет мачты М1 без отклонений и без учета совместной работы свай грунтом (рис. 2, в).

Конструкции в составе расчетной модели рассчитаны на воздействие постоянных и кратковременных нагрузок: собственный вес конструкций мачты; собственный вес площадки, молниеотвода и лестницы; нагрузка от гололеда; статическая ветровая нагрузка в двух ортогональных направлениях и по диагонали; пульсационная ветровая нагрузка в направлениях, соответствующих статической составляющей ветра. Характеристики рассмотренных в исследовании мачт приведены табл. 1.

Результаты

### Результаты

По результатам расчета определено напряженно-деформированное состояние элементов мачт и свай. В табл. 2 приведены результаты определения максимальных ( $\Delta_{max}$ ), начальных ( $\Delta_{нач}$ ), суммарных ( $\Sigma\Delta$ ) и предельных ( $\Delta_{пред}$ ) горизонтальных перемещений верха мачт от расчетного сочетания нагрузок.

По результатам, представленным в табл. 2 и на рис. 3, хорошо видно, что неучет совместной работы мачты М1 со сваями приводит к значительному (более чем в два раза) снижению расчетных перемещений. Это объясняется деформациями изгиба свай, а также вертикальными перемещениями свай в грунте. При этом применение более длинных свай позволяет уменьшить перемещения мачты, что хорошо видно по результатам расчета для мачты М4.

Наибольшие перемещения наблюдаются при действии ветровой нагрузки по диагонали (направление «ху»). При этом начальные отклонения мачты не влияют на расчетные перемещения (мачты М2 и М3). В рассмотренных примерах мачт ни расчетные максимальные, ни суммарные с учетом отклонений перемещения не превышают предельных значений.

В табл. 3 и на рис. 4 приведены результаты модального анализа колебаний мачт. Первая собственная частота колебаний мачты М1 выше, чем у мачт с учетом свайного основания

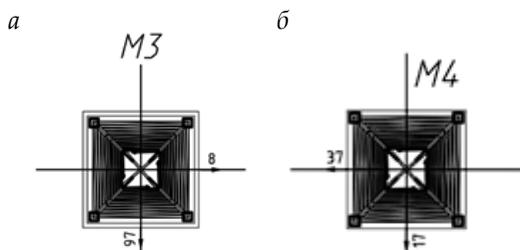


Рис. 1. Отклонения мачт от вертикали, мм  
Fig. 1. Mast's vertical slant, mm

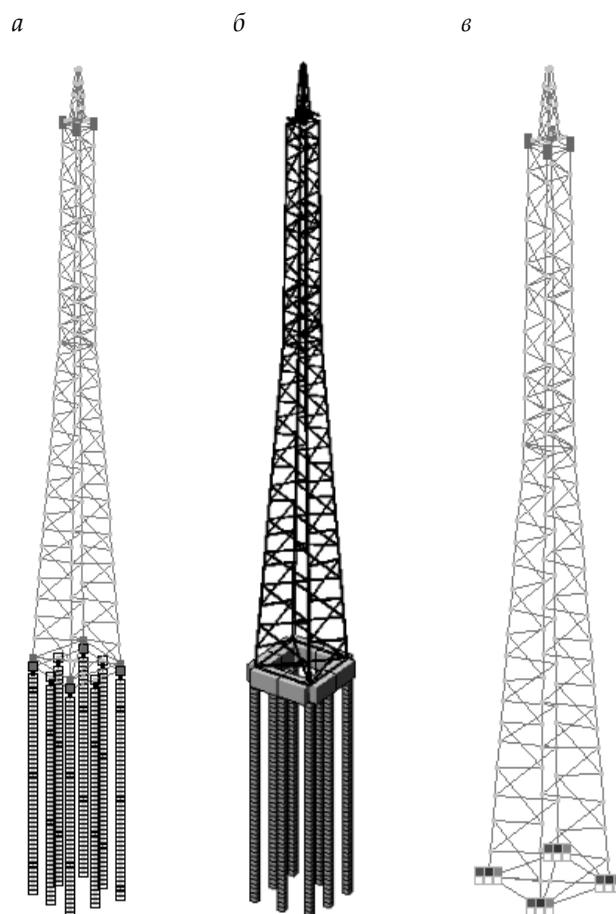


Рис. 2. Расчетные схемы мачт: *a* – стержневая модель; *б* – 3D-вид схемы; *в* – мачта М2 без свайных элементов  
 Fig. 2. Calculation schemes of masts: *a* – rod model; *b* – 3D view of the scheme; *c* – M2 no pile elements mast

Таблица 1. Характеристики мачт  
 Table 1. Masts characteristics

Мачта	Отклонения верха	Сваи
М1	Без отклонений	Без свай (гипотеза жесткого основания)
М2	Без отклонений	8 свай С120.30
М3	Отклонения: по $y = 97$ мм, по $x = 8$ мм	8 свай С120.30
М3	Отклонения: по $y = 37$ мм, по $x = 17$ мм	8 свай С160.30

в расчетной схеме. Учет свай увеличивает общую податливость системы, что и приводит к уменьшению частоты колебаний. По этой же причине для мачты М4 с более длинными сваями частоты колебаний оказались выше, чем для мачт М2 и М3. Учет отклонений от вертикали не влияет на частоты и формы колебаний мачт.

Стоит отметить, что при учете свай в расчетной схеме появляются моды продольных колебаний, вызванные деформацией основа-

ния. При этом значения частоты данной моды для М2 и М3  $f = 3,01$  Гц оказываются меньше предельной частоты  $f_{lim} = 3,8$  Гц, выше которой допускается не учитывать реакции сооружения. Однако усилия в элементах свай и поясов мачты при данной моде практически нулевые. Вторая мода и крутильная форма колебаний имеют частоты выше предельной, поэтому для рассмотренных мачт существенной является только первая форма поперечных колебаний.

Результаты определения продольных усилий  $N_{PCUmax}$  в самых нагруженных нижних элементах пояса мачт представлены в табл. 4 и на рис. 5. Наихудшее сочетание нагрузок то, которое включает в себя ветровое воздействие по диагонали, поэтому в табл. 4 приведены усилия от статической составляющей ветровой нагрузки  $N_{стат.в.}$ , пульсационной составляющей  $N_{пульс.}$  и суммарной  $N_{ветер}$ , а также расхождения в результатах определения данных составляющих для мачт со сваями в сравнении с мачтой М1 без свайных элементов в модели.

Как видно из табл. 4, усилия в элементах мачты М1 по РСУ оказались меньше, чем в элементах мачт со сваями (М2, М3 и М4), на

5–7 %, что может быть удовлетворительной точностью для инженерных расчетов. Однако для подобных сооружений усилия от ветрового воздействия составляют порядка 80–90 % от максимальных. Наибольшее расхождение в усилиях до 30 % наблюдается для пульсационной составляющей ветровой нагрузки, что объясняется разницей в собственных частотах колебаний. При этом суммарные усилия от ветра в моделях со сваями оказываются на 15 % выше усилий без учета свай. Таким образом, неучет свайного основания в расчетной модели подобных сооружений может привести к занижению внутренних усилий в элементах.

Таблица 2. Перемещения верха мачт  
Table 2. Displacements of the masts top

Мачта	$\Delta_{max}$ , мм			$\Delta_{нач}$ , мм			$\Sigma\Delta$ , мм			$\Delta_{пред}$ , мм
	x	y	xу	x	y	xу	x	y	xу	
М1	51,6	53,6	65,9	0,0	0,0	0,0	51,6	53,6	65,9	320
М2	114,0	116,0	139,0	0,0	0,0	0,0	114,0	116,0	139,0	320
М3	113,0	116,0	138,0	8,0	97,0	97,3	121,0	213,0	235,3	320
М4	97,5	99,0	119,0	17,0	37,0	40,7	114,5	136,0	159,7	320

Таблица 3. Модальный анализ  
Table 3. Modal analysis

Мачта М1		Мачта М2		Мачта М3		Мачта М4	
Частота, Гц	Хар-ка						
1,66	Попереч., 1-я мода	1,15	Попереч., 1-я мода	1,15	Попереч., 1-я мода	1,23	Попереч., 1-я мода
6,06	Частн.	3,01	Прод.	3,01	Прод.	4,19	Прод.
7,53	Попереч., 2-я мода	4,64	Попереч., 2-я мода	4,64	Попереч., 2-я мода	4,79	Попереч., 2-я мода
9,43	Крут., 3-я мода	6,06	Частн.	6,06	Частн.	6,06	Частн.
11,00	Частн.	8,98	Крут., 3-я мода	8,98	Крут., 3-я мода	8,98	Крут., 3-я мода

Таблица 4. Продольные силы в поясе (кН)  
Table 4. Normal forces in the leg of masts (kN)

Мачта	$N_{стат.в.}$	$N_{пульс.}$	$N_{ветер}$	$N_{PCUmax}$	$\Delta_{стат.в.}$ , %	$\Delta_{пульс.}$ , %	$\Delta_{ветер}$ , %	$\Delta_{PCUmax}$ , %
М1	-39,9	-23,2	-63,1	-75,9	–	–	–	–
М2	-42,3	-30,5	-72,8	-80,9	6,0	31,5	15,4	6,6
М3	-42,4	-30,5	-72,9	-81,2	6,3	31,5	15,5	7,0
М4	-42,4	-29,0	-71,4	-79,6	6,3	25,0	13,2	4,9

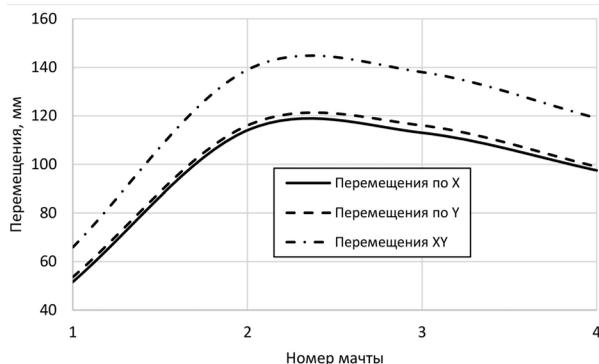


Рис. 3. Расчетные перемещения верха мачт  
Fig. 3. Calculated displacements of the masts top

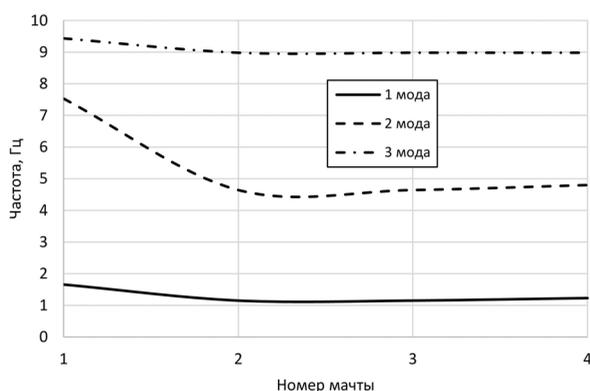


Рис. 4. Частоты колебаний мачт  
Fig. 4. Natural vibration frequencies of the masts

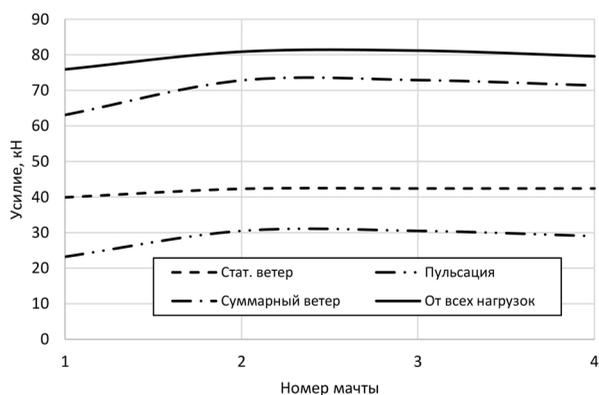


Рис. 5. Продольные силы в наиболее нагруженных элементах пояса  
Fig. 5. Normal forces in the most loaded leg of masts

## Выводы

1. Учет дефектов монтажа мачт в виде отклонений от вертикали при расчете не оказывает значительного влияния на результирующие перемещения и усилия.

2. Учет совместной работы свай с надземными конструкциями позволяет более точно определить напряженно-деформированное состояние мачт. При этом расчетные перемещения могут быть более чем в два раза выше, чем для мачт, рассчитываемых без учета свайного основания.

3. Учет свайного основания приводит к уменьшению собственных частот колебаний мачт, из-за чего увеличивается пульсационная составляющая ветровой нагрузки, а следовательно, и максимальные усилия в элементах конструкции. Расхождение для усилий от пульсации может составлять до 30 %, а от всех нагрузок – до 7 %.

4. Изменение жесткости свайного основания может служить путем регулирования перемещений, частот колебаний и усилий в надземных конструкциях сооружений башенного типа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловский В.Ф., Кондра М.П. Стальные башни (проектирование и монтаж). К.: Будівельник, 1979. 200 с.
2. Ращепкина С.А., Котельникова Т.О., Ращепкин С.В. Об оптимальном проектировании стальной башни // Вестник КРСУ. 2019. Т.19, № 12. С. 157–162.
3. Голиков А.В., Веремеев Д.В. Обобщенные принципы компоновки и назначения габаритных размеров трехгранных решетчатых башен // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 14–32.
4. Голиков А.В., Михальчонок Е.А., Мельникова Ю.А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4. С. 53.
5. Савицкий Г.А. Основы расчета радиомачт. Статика и динамика. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1953. 274 с.
6. Попова Ю.А., Акимова Э.К., Ращепкина С.А. Особенности работы стальной башни на различные нагрузки и воздействия // The Scientific Heritage. 2020. № 57. С. 53–61. DOI: 10.24412/9215-0365-2020-57-1-53-61.
7. Котельникова Т.О., Ращепкина С.А. Расчет стальной башни // Научный альманах. 2019. № 12-3 (62). С. 21–25.
8. Ключникова О.Н., Колегова Л.Ю. Сравнительный анализ поведения стальной решетчатой башни в ветровом потоке // Южно-Сибирский научный вестник. 2013. № 1 (3). С. 87–89.
9. Самохвалов И.А., Трянина Н.Ю., Облетов Е.Н. Напряженно-деформированное состояние стальной башни с учетом коррозионных повреждений элементов и соединений // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 5. С. 54–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.05.54-60.

10. Бикбулатова Г.Г., Искарёв Н.А., Рузанов Д.А. Геодезический мониторинг вертикальности прожекторных мачт // *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2024. № 2 (37).

11. Токмаков Е.В., Павлов О.В., Манабаев К.К., Павлов М.С., Яковлев А.Н. Наземное лазерное сканирование прожекторной мачты // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57, № 9/3. С. 243–246.

12. Токмаков Е.В., Павлов О.В. Технология наземного лазерного сканирования при контроле вертикальности прожекторных мачт // *Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апреля 2014 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет*. Том 3. Томск, 2014. С. 107–108.

13. Демшин С.В., Тетушкин С.С. Исследование расчетной динамической модели строительной конструкции на свайном фундаменте при сейсмических воздействиях // *Фундаменты*. 2024. № 1. С. 4–6.

14. Гайсин А.З., Крутяев С.А., Глазачев А.О. Исследование влияния диаметра буронабивной сваи на изменение коэффициента постели при расчете на горизонтальные нагрузки // *Градостроительство и архитектура*. 2019. Т. 9, № 4. С. 11–15. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.2.

## REFERENCES

1. Pavlovskiy V.F., Kondra M.P. *Stal'nye bashni (proektirovanie i montazh)* [Steel towers (design and erection)]. Kyiv, Budivel'nik, 1979. 200 p.

2. Rashchepkina S.A., Kotelnikova T.O., Rashchepkin S.V. About the optimal design of steel tower. *Vestnik KRSU* [Bulletin of KRSU], 2019, vol. 19, no. 12, pp. 157–162. (in Russian)

3. Golikov A.V., Veremeev D.V. Generalized principles of layout and dimensioning of trihedral lattice towers. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2023, iss. 1, pp. 14–32. (in Russian)

4. Golikov A.V., Mikhal'chonok E.A., Mel'nikova Yu.A. Analysis of the effect of the lattice type on the distribution of forces in the tower. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2019, no 4, p. 53. (in Russian)

5. Savitskiy G.A. *Osnovy rascheta radiomacht. Statika i dinamika* [Basics of radio mast calculation. Statics and dynamics]. Moscow, State Publishing House of Communication and Radio Literature, 1953. 274 p.

6. Popova Y., Akimova E., Rashchepkina S. Specific features of steel tower operation on various loads and impacts. *The Scientific Heritage* [The Scientific Heritage], 2020, no. 57, pp. 53–61. (in Russian) DOI: 10.24412/9215-0365-2020-57-1-53-61

7. Kotelnikova T.O., Rashchepkina S.A. Calculation of steel tower. *Nauchnyy al'manah* [Science Almanac], 2019, no. 12-3(62), pp. 21–25. (in Russian)

8. Klyuchnikova O.N., Kolegova L.Yu. Comparative analysis of the behavior of a steel lattice tower in wind flow. *Juzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-Siberian scientific bulletin], 2013, no. 1(3), pp. 87–89. (in Russian)

9. Samokhvalov I.A., Tryanina N.Yu., Obletov E.N. Stress-strain state of a steel tower taking into account corrosion damage to elements and joints. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2024, no. 5, pp. 54–60. (in Russian) DOI: 10.33622/0869-7019.2024.05.54-60

10. Bikbulatova G.G., Iskarev N.A., Ruzanov D.A. Geodetic monitoring of the verticality of searchlight masts. *Elektronnyy nauchno-metodicheskiy zhurnal Omskogo GAU* [Electronic scientific and methodological journal of Omsk GAU], 2024, no. 2(37). (in Russian)

11. Tokmakov E.V., Pavlov O.V., Manabaev K.K., Pavlov M.S., Yakovlev A.N. Terrestrial laser scanning of lighting mast. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika* [News of higher educational institutions. Physics], 2014, vol. 57, no. 9/3, pp. 243–246 (in Russian)

12. Tokmakov E.V., Pavlov O.V. Technology of ground-based laser scanning during vertical control of floodlight masts. *Sovremennye tehnika i tehnologii: sbornik докладов XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh, Tomsk, 14–18 aprelja 2014 goda* [Modern techniques and technologies: a collection of reports of the XX International Scientific and Practical Conference of students, graduate students and young scientists, Tomsk, April 14-18, 2014]. Tomsk. National Research Tomsk Polytechnic University. V. 3, 2014, pp. 107–108. (In Russian).

13. Demishin S.V., Tetushkin S.S. Study of the calculation dynamic model of a building structure on a pile foundation under seismic impacts. *Fundamenty* [Bases], 2024, no. 1. pp. 4–6 (in Russian)

14. Gaisin A.Z., Krutyayev S.A., Glazachev A.O. Study of the Influence of a Bored Pile Diameter on Change of Coefficient of Subgrade Reaction at Calculation for Horizontal Loads. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019, vol. 9, no. 4, pp. 11–15. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.2

Об авторах:

**ШИРОКОВ Вячеслав Сергеевич**

кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры металлических  
и деревянных конструкций  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

**SHIROKOV Viacheslav S.**

PhD in Engineerig Sciences, Senior Lecturer  
of the Metal and Wood Structures Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244  
E-mail: ShirokovViacheslav@gmail.com

**ЛЕОНЕНКО Александра Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры металли-  
ческих и деревянных конструкций  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: leonenko\_as@mail.ru

**LEONENKO Alexandra S.**

PhD in Engineerig Sciences, Associate Professor of the  
Metal and Wood Structures Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244  
E-mail: leonenko\_as@mail.ru

Для цитирования: Широков В.С., Леоненко А.С. Влияние дефектов монтажа и конструктивного исполнения фундамента на напряженно-деформированное состояние стальных прожекторных опор // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 3. С. 23–29. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.03.

For citation: Shirokov V.S., Leonenko A.S. Influence of assembly defects and foundation construction on the stress-strain state of steel lighting masts. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 3, pp. 23–29. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.03.03.

Принята: 13.03.2025 г.