



20. Vanus D.S., Zharikhin A.A. Calculation and forecasting of operational durability of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 533. P. 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202453302025.

© И. А. Терехов

Ссылка для цитирования:

Терехов И. А. Модель снижения несущей способности в рамках методологии оценки конструктивной безопасности железобетонных элементов и зданий // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 5–12.

УДК 624.94

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-12-21

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПОР ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ**

А. В. Голиков, А. В. Танасогло

Голиков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (960) 877-74-57; e-mail: alexandr_golikov@mail.ru;

Танасогло Антон Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (915) 544-36-23; e-mail: a.v.tan@mail.ru

В статье представлены результаты анализа конструктивных решений и численно-аналитического исследования работы под нагрузкой опор двойного назначения. Выполнен анализ требований Распоряжений правительства ряда городов России, регламентирующих способы размещения блоков оборудования и фидерных трасс, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций и архитектурный облик дорожной инфраструктуры. Для наиболее распространенного в практике строительства конструктивного решения опор двойного назначения в виде сечений из круглых труб разработаны и рассчитаны серии моделей. По результатам расчетно-аналитической работы установлены характерные особенности напряженно-деформированного состояния конструкций: установлена группа предельных состояний, требования которой оказывают определяющее влияние на сечения ствола опоры, определено количественное влияние способов расположения фидерных трасс вдоль ствола на уровень данного состояния. Даны рекомендации по подходам к разработке достоверных расчетных моделей сооружения опор двойного назначения.

Ключевые слова: опора двойного назначения, конструктивные решения, напряженно-деформированное состояние, прочность, расчетно-аналитическое обоснование, аэродинамический коэффициент, фидерные трассы, механическая безопасность.

**STRESS-STRAIN STATE OF SOLID CROSS-SECTION DUAL-PURPOSE SUPPORTS
TAKING INTO ACCOUNT THE SPECIFICS OF EQUIPMENT PLACEMENT**

A. V. Golikov, A. V. Tanasoglo

Golikov Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal and Timber Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (960) 877-74-57; e-mail: alexandr_golikov@mail;

Tanasoglo Anton Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal and Timber Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (915) 544-36-23; e-mail: a.v.tan@mail.ru

This paper presents the results of an analysis of design solutions and a numerical-analytical study of the behavior under load of dual-purpose support structures. An analysis was performed of the requirements set forth by Decrees of the municipal governments of a number of Russian cities. These regulations govern the methods for placing equipment blocks and feeder cable routes, which impact the stress-strain state of the structures and the architectural appearance of road infrastructure. For the most common dual-purpose support structures design solution used in construction practice, employing cross-sections made of circular tubes, a series of models were developed and analyzed. Based on the results of the computational and analytical work, characteristic features of the stress-strain state were identified: a group of limit states was established, the requirements of which have a determining influence on the cross-sections of the support mast; the quantitative influence of the feeder route arrangement methods along the mast on the stress-strain state level was determined. Recommendations are provided regarding approaches for developing reliable computational models of dual-purpose support structures.

Keywords: dual-purpose support structures, design solution, stress-strain state, strength, design and analysis verification, aerodynamic coefficient, feeder cable routes, mechanical safety.

Введение

Создание условий для обеспечения населения городов качественной беспроводной связью неразрывно связано со строительством и эксплуатацией опор сотовой связи и опор двойного назначения для размещения оборудования инфраструктурных операторов. Требования по размещению и эксплуатации оборудования на опорах двойного назначения, опорах базовых станций подвижной радиотелефонной связи и контактной сети на опорах наружного

освещения устанавливаются постановлениями администраций городов, например, требованиями администраций Москвы [11], Великого Новгорода, Владимира и др. Конструкции типовых опор регламентированы материалами постановлений и конструктивно представляют собой сооружения высотой до 29,0 м со ступенчато уменьшающимся по высоте сечением, выполненным из круглых труб. Анализ установленных в городах опор показал не соответствие требованиям постановлений в части

расположения кабельных трасс, а именно «монтаж кабельных трасс (фидер РРС, ВЧ, оптические кабели, электрические кабели и т. д.) прокладывать внутри тела опор двойного назначения (ОДН). В исключительных случаях допускается монтаж кабельных трасс по внешней стороне ОДН, при условии покраски проложенных кабелей и элементов крепления в цвет с опорами. Не соблюдаются рекомендуемое постановлениеми камуфлирование оборудования на опорах. Невыполнение указанных рекомендаций приводит к увеличению ветровой нагрузки на опоры и ухудшению внешнего эстетического облика дорожной инфраструктуры.

Среди многообразия типов башенных сооружений, детально описанных в научной литературе [3–5, 7, 9, 16], наибольшее распространение в качестве опор транспортной инфраструктуры получили опоры двойного назначения.

Опоры двойного назначения – это универсальные металлические конструкции, предназначен-

ные для одновременного размещения на них оборудования для уличного освещения и устройств различного специализированного назначения, таких как антенны сотовой связи и другое телекоммуникационное оборудование. Сфера применения данных конструкций, их достоинства и недостатки описаны в работе Р. И. Микулич, Е. П. Вишнякова [15].

В соответствии с существующей практикой проектирования, исходя из критерия соотношения геометрических параметров сооружения, ОДН относится к высотным сооружениям [14]. Для установки в плотной городской застройке разработано два принципиальных типа сплошностенчатых опор: из трубчатых секций ступенчато переменного сечения (рис. 1а), и в виде многогранной сплошностенчатой оболочки переменного поперечного сечения по длине, уменьшающимся от низа к верху (рис. 1б). Широкое распространение в практике получили опоры со стволом из труб.

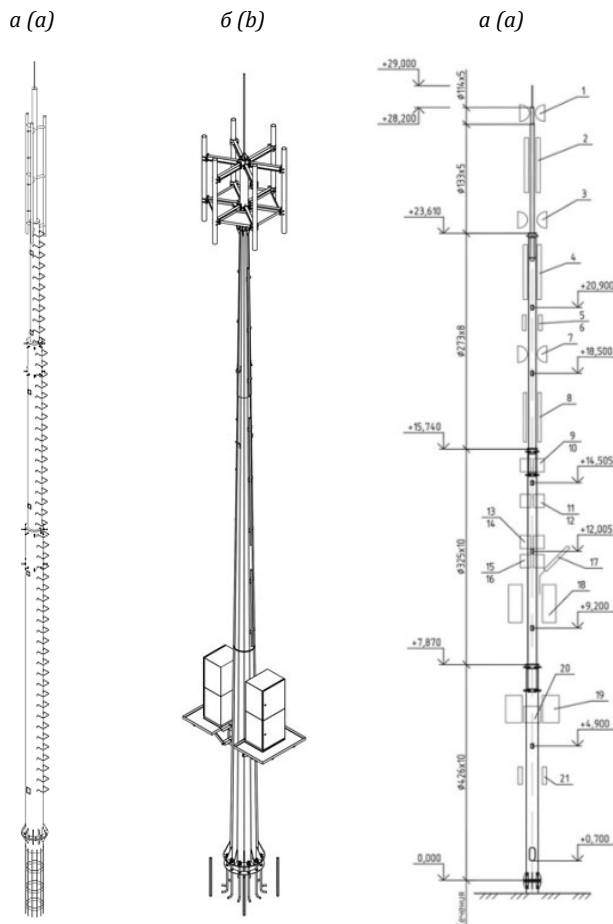


Рис. 1. Основные конфигурации опор:
а) опора с сечением из круглых труб;
б) коническая многогранная опора
(иллюстрация авторов)
Fig. 1. Basic configurations of supports:
a) support with a cross-section of round
pipes; b) conical polygonal support
(illustration by the authors)

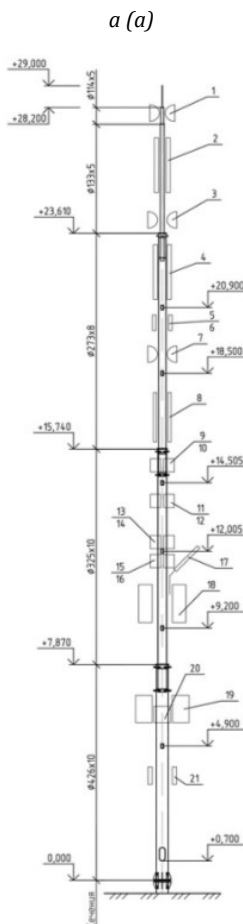


Рис. 2. Типовая схема размещения оборудования на конструкции ОДН:
а) схема размещения на опоре; б) характеристика оборудования
(иллюстрация авторов)

Fig. 2. Typical equipment placement diagram on a DPS structure:
a) placement diagram on a support; b) equipment characteristics
(illustration by the authors)

Позиция	Тип оборудования	Габариты, мм
1	Radio Relay Antenna	Ø 600
2	BS Antenna	2058 x 262 x 149
3	Radio Relay Antenna	Ø 600
4	BS Antenna	2058 x 262 x 149
5	Booster	492 x 133 x 560
6	Booster	486 x 325 x 125
7	Radio Relay Antenna	Ø 600
8	BS Antenna	2058 x 262 x 149
9	Booster	492 x 133 x 560
10	Booster	486 x 325 x 125
11	Booster	492 x 133 x 560
12	Booster	486 x 325 x 125
13	Booster	492 x 133 x 560
14	Booster	486 x 325 x 125
15	Booster	492 x 133 x 560
16	Booster	486 x 325 x 125
17	Кронштейн РКУ	2213 x 1827 x 48
18	Booster	1000 x 600 x 600
19	Booster	1390 x 490 x 670
20	Booster	600 x 600 x 250
21	Booster	630 x 450 x 300

Основной нагрузкой на высотные сооружения является нагрузка от веса конструкций и веса оборудования, ветровая нагрузка [6].

К технологическому оборудованию сетей мобильной связи относят: антенны для базовых станций сотовой связи (KADAMM, Kathrein и др.); антенны РРЛ (радиорелейных линий) диапазона сверхвысоких и крайне высоких частот; элементы фидерного тракта базовых станций сотовой связи.

Типовая схема расположения технологического оборудования по высоте опоры приведена на рисунке 2.

Определяющее влияние на работу опор оказывает ветровая нагрузка [8]. В СП 20.13330 даются указания по расчету аэродинамического коэффициента для отдельных конструкций и конструктивных элементов, однако отсутствуют указания по назначению аэродинамического коэффициента на группу блоков оборудования. Для достоверной оценки действительных значений аэродинамических коэффициентов группы блоков оборудования

следует выполнять модельные натурные или численные эксперименты, что существенно усложняет процесс расчета сооружений.

Численные исследования изменения значений аэродинамических коэффициентов группы блоков оборудования представлены в работе Т. А. Белаш [2]. Анализ результатов данной публикации показал, что значение аэродинамического коэффициента в зависимости от вылета антенны от центральной стойки опоры варьируется в диапазоне от 0,8 до 1,4. Опираясь на результаты данного исследования при расчете сооружений для обеспечения механической безопасности опоры с учетом произвольного угла атаки ветра принимаем наиболее неблагоприятное значение аэродинамического коэффициента значением, равным 1,4.

За годы развития сотовой связи разработаны сотни унифицированных опор для различных высот сооружения (например, рис. 3).

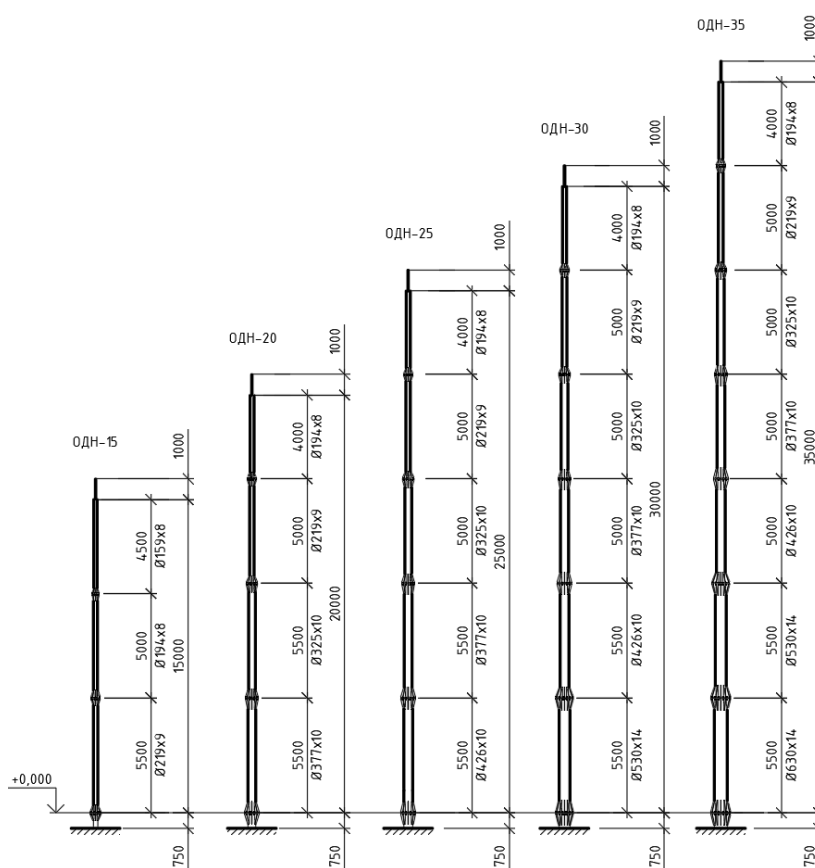


Рис. 3. Линейка типовых опор (ООО «Элмашпром») высотой от 15,0 до 35,0 м (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. A range of typical supports (LLC «Elmashprom») with a height from 15.0 to 35.0 m (illustration by the authors)

Целью данной работы является оценка характера работы под нагрузкой конструкций стальных опор двойного назначения.

Задачи исследования:

- анализ конструктивных решений и методов расчетов стальных опор двойного назначения;
- классификация требований к размещению оборудования базовых станций операторов сотовой связи;

- оценка напряженно-деформированного состояния отдельных типов опор;
- систематизация результатов расчетов конструкций опор.

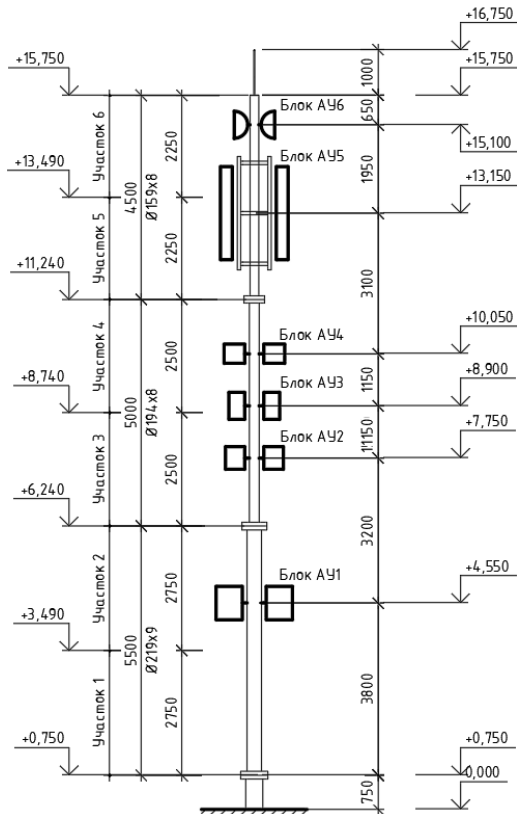
Материалы и методы

Решение задач исследования выполним путем расчета отдельных типовых опор. Рассмотрим отдельные вопросы расчета ветровой нагрузки по причине основного влияния ветровой ее на работу сооружения.

Нормативное значение ветровой нагрузки w определяется в соответствии с указаниями п.11.1.2 СП 20.13330.2016. Определяющее влияние на значение ветровой нагрузки оказывает ряд факторов: изменение жесткости сооружения по высоте, месторасположение объекта строительства, конфигурация и характер расположения оборудования относительно оси сооружения.

Определение аэродинамического коэффициента имеет свои особенности для сплошнотенчатых и решетчатых конструкций, а также для элементов оборудования.

Перед проведением расчета следует выполнить разбиение опоры на расчетные участки с четким определением месторасположения оборудования и его параметров. Для опоры высотой 15 м схема представлена на рисунке 4.



Ведомость оборудования

Марка оборудования	Размеры, мм			Кол-во	Вес 1 блока, кг	Примечание
	Высота	Ширина	Толщина			
АУ6	Ø	600		2	20	Антенны с РРС рад.мод.
АУ5	2100	400	200	3	34	Секторные антенны
АУ4	420	460	130	3	24	Передачки 2G
АУ3	600	350	110	3	20	Передачки 3G
АУ2	500	430	180	3	23	Передачки 4G
АУ1	740	580	580	2	155	Система питания

Рис. 4. Схема опоры сплошного сечения высотой $H = 15,75$ м (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. Diagram of a solid section support with a height of $H = 15,75$ m (illustration by the authors)

По конструктивной схеме сооружение представляет собой опору сплошного сечения ступенчато-переменной по высоте жесткости: тип сечения 1 от отм. 0,000 м до отм. 6,240 м; тип сечения 2 от отм. 6,240 м до отм. 11,240 м; тип сечения 3 от отм. 11,240 м до отм. 15,750 м.

Для выполнения расчета опоры условно разделена на 6 расчетных участков.

Соединение секций выполнено на фланцах. Опорная секция жестко закреплена в основании. Сооружение предусмотрено для эксплуатации в г. Москве. Тип местности – В.

Для расчета высотных сооружений, как правило, предварительно необходимо определить значения и формы первых частот колебаний сооружения, что позволит в дальнейшем правильно выполнить расчет ветровой нагрузки [12, 13].

Результаты и обсуждение

По результатам сбора нагрузки от веса конструкций и оборудования (рис. 5а–б) выполнен модельный анализ с определением форм и частот собственных колебаний опор (рис. 5в–д).

Расчет ветровой нагрузки на ствол опоры и на оборудование представлен в табличной форме

(расчет на ствол представлен в таблице 1, на оборудование – в таблице 2).

Форма размещения фидерного тракта различается для различных операторов, типа опоры и района размещения, что учитывается в каждом конкретном случае индивидуально.

При проведении расчета ОДН данного исследования выполнен расчет ветровой нагрузки на оборудование при условии размещения фидерного тракта в защищенном коробе, размещенном вдоль ствола опоры. Аэродинамический коэффициент для короба размещения фидерного тракта принимается равным наибольшему из возможных значений, равным $c_x = 1,4$; фидерный тракт размещается, как правило, от уровня первого блока антенных устройств (не от уровня поверхности земли).

В соответствии с указаниями п. Д.1 СП 20.13330.2016 (с изм. 1–6) «при учете ветровых нагрузок перемещения несущих конструкций определяются от действия ее средней составляющей. При этом действия ее пиковой и пульсационной составляющих не учитываются».

Таблица 1

Расчет ветровой нагрузки на ствол опоры

№ п/п	№ уч.	Отм. границ, м	Отм. серед., z(e) м	k(z _e)	C _x табл.	w _m , кПа	Rw _m ствола, кН/м	ζ(z _e)	w _g , кПа	Норм. w, кПа	Расчетн. R _w ствола кН/м
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6	15,750	16,25	0,789	1,158	0,210	0,021	0,962	0,308	0,519	0,013
2		13,500	14,63	0,757	0,597	0,104	0,017	0,982	0,156	0,260	0,058
3	5	11,250	12,38	0,708	0,597	0,097	0,015	1,016	0,151	0,248	0,055
4	4	8,750	10,00	0,650	0,599	0,090	0,017	1,060	0,145	0,234	0,064
5	3	6,250	7,50	0,579	0,599	0,080	0,015	1,123	0,137	0,217	0,059
6	2	3,500	4,88	0,488	0,395	0,044	0,010	1,224	0,083	0,127	0,039
7	1	0,750	2,13	0,350	0,395	0,032	0,007	1,445	0,070	0,102	0,031

Таблица 2

Расчет ветровой нагрузки на оборудование

№ п/п	№ уч.	Отм. середины, z(e), м	Тип оборудования	Отм. середины оборудов.	k(z _e)	C _x (B.5)	w _m , кПа	ζ(z _e)	w _g , кПа	Нормативн. w, кПа
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	14,625	Антенна РРС	15,10	0,77	1,40	0,247	0,98	0,367	0,614
			Фидерн. трасса (ФТ)	14,45	0,75	1,40	0,243	0,98	0,364	0,607
2	5	12,375	Антенна секторальная	13,15	0,73	0,672	0,112	1,00	0,172	0,284
			ФТ	12,73	0,71	1,40	0,228	1,02	0,353	0,581
3	4	10,00	Блок RRU (2G)	10,05	0,65	1,329	0,199	1,06	0,321	0,520
			Блок RRU (3G)	8,90	0,62	1,091	0,156	1,08	0,258	0,413
			ФТ	8,98	0,65	1,40	0,209	1,06	0,338	0,548
4	3	7,50	Блок RRU (4G)	7,75	0,59	1,213	0,164	1,12	0,279	0,442
			ФТ	7,13	0,58	1,40	0,187	1,12	0,319	0,506
5	2	4,875	Система питания	4,55	0,47	1,160	0,127	1,24	0,240	0,366
			ФТ	4,21	0,49	1,40	0,157	1,22	0,293	0,450

По причине противоречивости требований в ограничении горизонтальных перемещений верха башни для различных операторов связи приняты требования нормативных документов, а именно, перемещения от действия нормативного значения средней составляющей ветровой нагрузки не должны превышать 1/100 высоты сооружения.

Предельно допустимые деформации верха опоры от действия нормативного значения средней составляющей ветровой нагрузки для башни высотой H = 15,75 м составляют:

$$f_u = \frac{H}{100} = \frac{15,75 \text{ м}}{100} = 0,1575 \text{ м.} \quad (1)$$

Особенностью расчета узкобазых башен сплошного сечения является приоритет выполнения требований второй группы предельных состояний (ограничение перемещений) перед требованиями первой группы предельных состояний (обеспечение несущей способности). По указанной причине предельные сечения стержням сплошностенчатых опор подбираются по жесткости, а в последствии проверяются по прочности.

Результаты расчета деформаций и усилий приведены на рисунке 6.

Максимальные горизонтальные перемещения верха опоры от действия нормативного значения средней составляющей ветровой нагрузки по данным рисунка 6 составили 143 мм, что приближается к предельному значению в 157,5 мм, но не превышает его.

Для опоры сплошного сечения в соответствии с принятым конструктивным решением проверены сечения на следующих отметках: отм. 0,000 м – на уровне заделки в фундамент; отм. +0,750 м – низ первого участка (нижнее сечение первой монтажной секции): Ø219 × 9; отм. +6,240 м – низ третьего участка (нижнее сечение второй монтажной секции): Ø194 × 8; отм. +6,240 м – низ пятого участка (нижнее сечение третьей монтажной секции): Ø159 × 8.

Проверка прочности ствола опоры при определении условия обеспечения жесткости осуществляется по критерию обеспечения прочности от действия продольной силы и изгибающего момента по формуле:

$$\left(\frac{N}{A} + \frac{M}{W} \right) / (R_y \cdot \gamma_c) \leq 1 \quad (2)$$

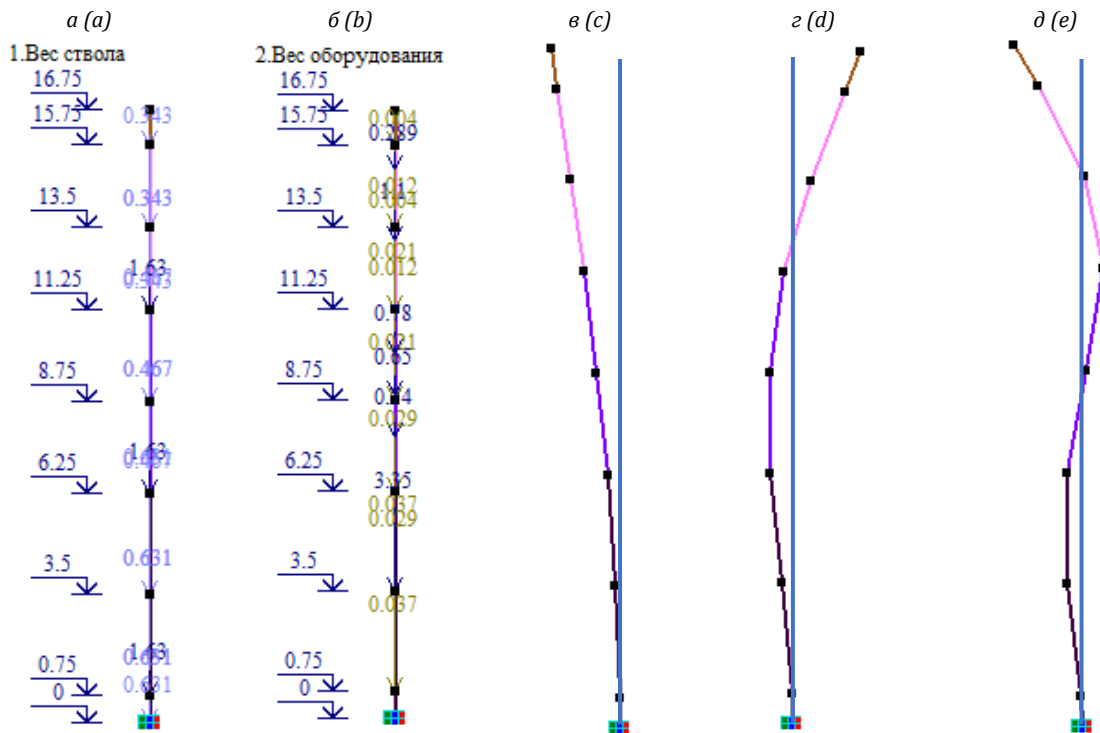


Рис. 5. Опора сплошного сечения ступенчато-переменной по высоте жесткости:

- а) загрузка опоры нагрузками от веса ствола; б) загрузка опоры нагрузками от веса оборудования;
 в) первая форма колебаний с частотой $f_1 = 0,581$ Гц; г) вторая форма с частотой $f_2 = 2,799$ Гц;
 д) третья форма с частотой $f_3 = 6,51$ Гц (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Support of solid cross-section with step-variable rigidity in height:

- a) support loading with loads from the weight of the shaft; b) support loading with loads from the weight of the equipment;
 c) the first form of oscillations with a frequency $f_1 = 0.581$ Hz; d) the second form with a frequency $f_2 = 2.799$ Hz;
 e) the third form with a frequency $f_3 = 6.51$ Hz (illustration by the authors)

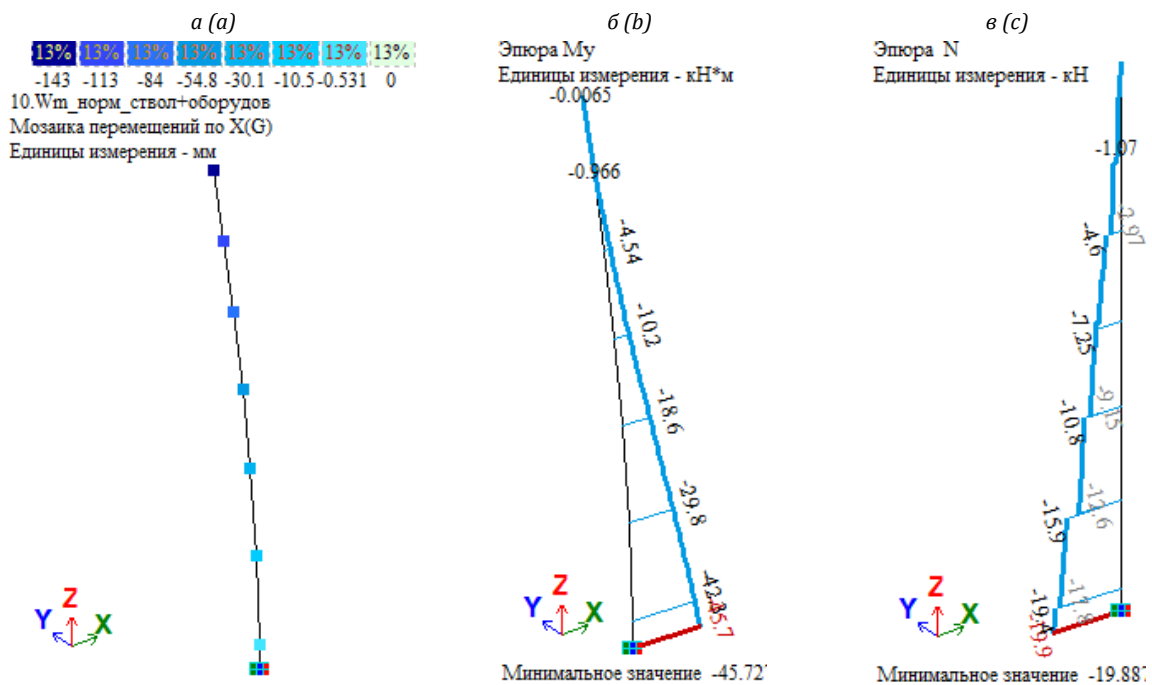


Рис. 6. Результаты расчета:

- а) деформации расчетных узлов опоры от действия средней составляющей ветровой нагрузки;
 б) эпюра распределения моментов; в) эпюра распределения продольных сил (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Calculation results:

- a) deformations of the calculated support nodes due to the action of the average component of the wind load;
 b) moment distribution diagram; c) longitudinal force distribution diagram (illustration by the authors)

Результаты проверки прочности ствола на расчетных участках приведены в таблице 3.

Следует обратить внимание на следующие характерные особенности напряженно-деформированного состояния ОДН: при определяющем условии обеспечения жесткости опоры работает с существенным запасом прочности сечений; собственный вес опоры и вес оборудования не оказывает значимого влияния на уровень напряженного состояния ствола, общий вклад продольной силы не превышает 3-5% от общей величины напряжений.

Анализ способов размещения проводов эксплуатируемых опор показал, что провода вокруг ствола размещаются преимущественно в виде сгруппированных веток, прикрепленных к стволу (рис. 7). При таком размещении аэродинамический коэффициент для рабочей пары «ствол + фидеры» будет

приближаться к значению 1,2–1,4, что более чем в 2 раза превышает значения табл. 1. Соответственно запасы прочности ствола, указанные в табл. 3, существенно уменьшатся, равно как и увеличится горизонтальное смещение верха опоры. Указанная особенность эксплуатации антенных опор является показательным примером, что расчетная модель сооружения и способ приложения нагрузок является результатом принятого уровня детализации и не всегда отражает действительную работу сооружения под нагрузкой.

Выполнен анализ влияния на усилия в стволе расположенных вдоль ствола веток фидеров. Результаты моделирования работы опор с удаленными внутрь ствола проводами показывают, что снижение усилий в стволе достигает 10–15 %.

Таблица 3

Проверка сечений опоры сплошного сечения

№ п/п	№ уч.	Труба ствола на участке, мм	$A_{\text{ствол}}, \text{ м}^2$	$W_{\text{ствол}}, \text{ м}^3$	Продольная сила в стволе на участке, N, кН	Момент на участке, M, кН·м	Проверка прочности ствола (коэфф. использ. сечения, $K_{пр}$) $K_{пр} \leq 1$	Запас НС, %
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	Ø159 × 6	2,883E-03	1,063E-04	4,60	4,54	0,1304 < 1	87,0
2	3	Ø194 × 8	4,672E-03	2,087E-04	10,80	18,60	0,2689 < 1	73,1
3	1	Ø219 × 9	5,935E-03	2,993E-04	19,40	42,30	0,4253 < 1	57,5
4	0	Ø219 × 9	5,935E-03	2,993E-04	19,89	45,72	0,4591 < 1	54,1

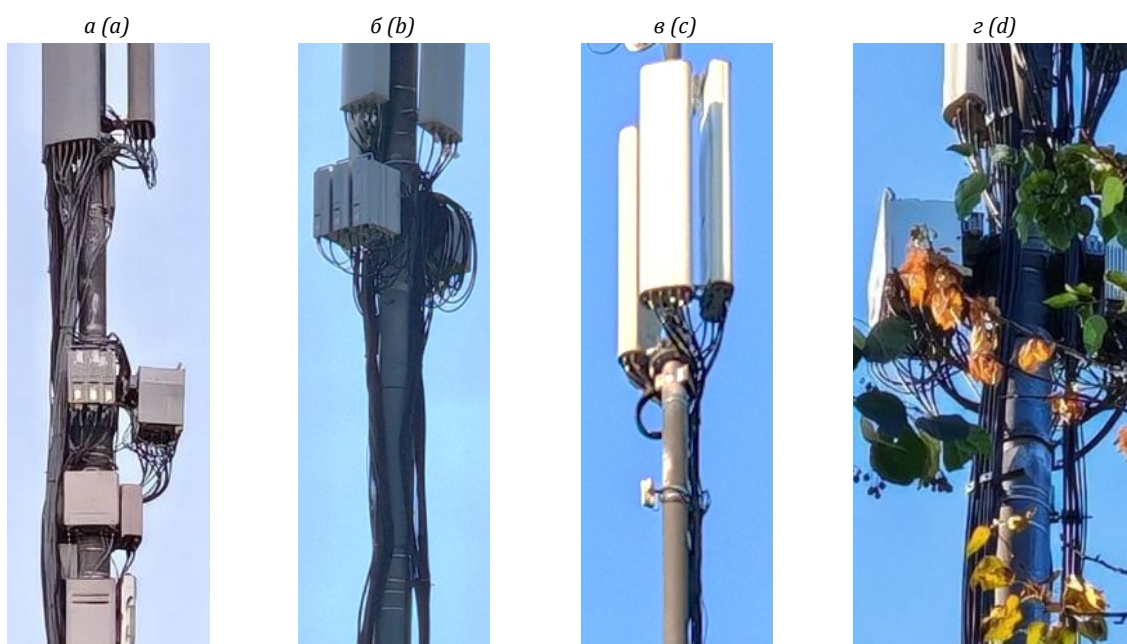


Рис. 7. Примеры размещения проводов (фидеров) вдоль ствола ОДН:

- а) и в) с односторонним креплением к стволу; б) с двусторонним симметричным креплением; г) с двусторонним несимметричным креплением с отступом от ствола (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Examples of placing wires (feeders) along the DPS trunk:

- a) and c) with one-sided fastening to the trunk; b) with two-sided symmetrical fastening; d) with two-sided asymmetrical fastening with an indent from the trunk (illustration by the authors)

Таким образом, в случае выполнения рекомендаций Распоряжений правительства городов [11] по размещению проводов внутри ствола опоры ветровая нагрузка снижается незначительно и, как следствие, данное мероприятие не оказывает значимого

влияния на сечения ствола опоры, а учет влияния при выполнении расчетов может быть осуществлен введением коэффициента 1,15. Однако следует обра-

титель внимание, что внешнее расположение множественных проводов оказывает влияние на эстетический облик дорожной инфраструктуры.

Повышение эффективности проектирования антенно-мачтовых сооружений сотовой связи на основе оценки конструктивных решений, детальной оценки несущей способности, в том числе путем разработки достоверных информационных моделей продолжаются как коллективами отечественных [1, 10, 17], так и зарубежных авторов [18–22].

Заключение

1. Выполнена классификация опор двойного назначения по типам конструктивных решений. По результатам анализа статистики установлено, что наиболее распространенным типом являются опоры кольцевого сечения. Расчет опор и оценка их НДС выполняется путем проверки несущей способности по критерию прочности, а требования к оценке жесткости существенно разнятся у различных операторов сотовой связи.

2. Установлены требования, отраженные в Распоряжениях правительства ряда городов России, регламентирующие способы размещения блоков оборудования и фидерных трасс, оказывающих влияние на НДС конструкций и архитектурный облик дорожной инфраструктуры. Обработка серии

наблюдений показала, что в подавляющем большинстве случаев расположение фидерных трасс осуществляется с наружной стороны ствола опоры с отступлением от требований.

3. По результатам расчета ОДН установлено, что определяющим при расчете сечений являются требования 2 группы предельных состояний.

4. Наружное расположение фидеров, сблокированных в виде двух равноудаленных от опоры пучков, приводит к повышению усилий в стволе опоры на 10–15 %. Следует отметить, что наружное расположение фидеров в виде пучков, плотно прижатых к стволу опоры, приводит к повышению усилий в стволе более, чем в два раза за счет появления единого наветренного фронта в виде рабочей пары «ствол + фидеры» с единым аэродинамическим коэффициентом, близким к 1,4.

5. Для обеспечения механической безопасности ОДН, как ответственных сооружений дорожной инфраструктуры, следует особое внимание уделять разработке достоверных численных и аналитических моделей сооружения совместно и с учетом специфики размещаемого на сооружении технологического оборудования.

Список литературы

1. Ананьин М.А., Логунова Т.А., Дорофеева Н.Л. Оценка несущей способности металлоконструкций антенной опоры // Молодежный вестник ИрГТУ. 2023. Т. 13, N 2. С. 399-404.
2. Белаш Т.А., Сафин Р.Р. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них // Вестник НИЦ «Строительство». 2024. Т. 41. N 2. С. 18-28. URL: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28). (дата обращения: 21.04.2026) ISSN 2782-3938
3. Голиков А. В., Михальчонок Е. А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20, N 2. С. 163-173. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173> (дата обращения: 21.04.2026).
4. Горохов Е.В., Васылев В.Н., Алехин А.М., Ягмур А.А. Анализ конструктивной формы антенных опор радиорелейной связи // Металлические конструкции. 2010. Т. 16, N 1. С. 41-50. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-1/04_gorohov_vasylev_alehin_yagmur.pdf (дата обращения: 21.04.2026). ISSN 1993-3517
5. Губанов В.В., Голиков А.В. Особенности проектирования дымовых труб с жесткими подкосами // Металлические конструкции. 2011. Т. 17, N 2. С. 115-122. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-2/05_gubanov_golikov.pdf (дата обращения: 21.04.2026). ISSN 1993-3517
6. Мельников Н. П. Антенные сооружения М.: «Знание», 1969. 47 с.
7. Новиков М.Ю., Канаков И.Д., Калаев В.П., Манохин П.Е. Антенно-мачтовые сооружения сотовой связи: классификация, тенденции в строительстве, проблемы проектирования // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9, N 1. С. 75–81. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2023/03/2023-N1-Novikov-Manokhin.pdf> (дата обращения: 21.04.2026) ISSN 2413-9858
8. Павловский В. Ф., Кондра М.П. Стальные башни: проектирование и монтаж. Киев : Будівельник, 1979. 200 с.
9. Перельмутер А. В. Становление и развитие ключевых идей проектирования высотных конструкций антенных сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2021. N 1. С. 10-20. DOI:10.33622/0869-7019.2021.01.10-20
10. Пиляй А.И. Информационная модель оценки конструктивных решений в строительстве // Экономика Строительства. 2022. N 6. С.98-103
11. Распоряжение Правительства Москвы «О мерах по размещению оборудования базовых станций подвижной радиотелефонной связи и контактной сети на опорах наружного освещения в городе Москве» от 25 апреля 2023 г. № 265-ПП [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1301461719>
12. Синельщиков А. В. Обеспечение полноты учета собственных форм и частот при расчете сооружений на сейсмостойкость // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 1 (39). С. 52–57. URL: https://agacy.pf/journal/wp-content/uploads/2022/03/isvp_1_39_2022_52-57.pdf (дата обращения: 25.05.2026). DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-52-57
13. Синельщиков А. В., Завьялов Р. А. Влияние внешнего нагружения на изменения собственных частот и форм колебаний промышленного здания. Часть 1 // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 4 (46). С. 8–13. URL: https://agacy.pf/journal/wp-content/uploads/2023/12/isvp_4_46_2023_8-13.pdf (дата обращения: 25.05.2026). DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-8-13
14. Соколов А. Г. Металлические конструкции антенных устройств. М. : Стройиздат, 1971. 240 с.



15. Сотовая связь. История. Стандарты. Технологии [интернет]. Режим доступа: <http://celnet.ru/gal49.php> (дата обращения 21.04.2026)
16. Танасогло А.В., Бакаев С.Н., Волчков А.Н., Бакаева, Переварюха Н.А. Новое проектное решение антенной опоры для стесненных городских условий // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. N 3 (125). С. 50-54. URL: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/2017-3\(125\)/st_09_tanasoglo_bakaev_volchkov_bakaeva_perevaryuha.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/2017-3(125)/st_09_tanasoglo_bakaev_volchkov_bakaeva_perevaryuha.pdf) (дата обращения: 21.04.2026). ISSN 2519-2817
17. Тарануха Н.Л., Новиков М.Ю. Повышение эффективности проектирования антенно-мачтовых сооружений сотовой связи на основе оценки конструктивных решений // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26, N 1. С. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2023-1-84-90> (дата обращения: 21.04.2026)
18. Amlan Das, Shiva Kumar. Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines // International Journal of Science and Research. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 999–1003.
19. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity / X. Fu [et al.]. // Engineering Structures. 2021. Vol. 233. P. 111913. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73311833> (дата обращения: 21.09.2022 дата обращения: 21.04.2026). ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.111913.
20. Full-Scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission Tower under Extreme Wind Loads / X. Fu [et al.]. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019. Vol. 190. P. 119-133. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38967402> (дата обращения: 21.09.2022 дата обращения: 21.04.2026). ISSN 0167-6105. DOI 10.1016/j.jweia.2019.04.011.
21. Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century / J. M. Adam [et al.]. // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. P. 122-149. URL: <https://iranarze.ir/storage/uploads/2019/01/E10800-IranArze.pdf> (дата обращения: 21.04.2026). DOI 10.1016/j.engstruct.2018.06.082.
22. Zheng L., Wang W., Li H. Progressive Collapse Resistance of Composite Frame with Concrete Filled Steel Tubular Column under a Penultimate Column Removal Scenario // Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 189. P. 107085. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58587799> (дата обращения: 21.04.2026). ISSN 0143-974X. DOI 10.1016/j.jcsr.2021.107085.

References

1. Ananyin M. A., Logunova T. A., Dorofeeva N. L. (2023) "Assessment of the bearing capacity of metal structures of antenna supports", Youth Bulletin of IrSTU, vol. 13, no. 2., pp. 399-404.
2. Belash T.A., Safin R.R. (2024), "Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics", Bulletin of Science and Research Center of Construction, vol. 41, no. 2, pp. 18-28, available at: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28) (Accessed 21 April 2026). ISSN 2782-3938
3. Golikov A.V., Mikhailchonok E.A. (2019) "Determination of the rational constructive form of cellular communication towers", RUDN Journal of Engineering Researches, vol. 20, no. 2, pp. 163–173. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173>
4. Gorokhov Ye. V., Vasylev V. N., Alyokhin A. M., Yagmur A. A. (2010) "Analysis of the constructive form of the radio-relay communication antenna supports", Metal constructions, vol. 16, no. 1, pp. 41-50, available at: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-1/04_gorohov_vasylev_alehin_yagmur.pdf (Accessed 21 April 2026). ISSN 1993-3517
5. Gubanov V.V., Golikov A.V. (2011) "Specifics of designing chimneys with rigid braces", Metal constructions, vol. 17, no. 4, pp. 217-224, available at: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2011-2/05_gubanov_golikov.pdf (Accessed 21 April 2026). ISSN 1993-3517
6. Melnikov N.P. (1969) Antennnye sooruzheniya [Antenna structures], Moscow. Isdatelstvo «Znanie», Soviet Union.
7. Novikov M.Yu., Kanakov I.D., Kalae V.P., Manokhin P.E. (2023) "Antenna-mast structures of cellular communication: classification, trends in construction, design problems", Journal of Science and Education of North-West Russia, vol.9, no.1, pp. 75–81, available at: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2023/03/2023-N1-Novikov-Manokhin.pdf> (Accessed 21 April 2026). ISSN 2413-9858
8. Pavlovskiy V. F., Kondra M. P. (1979) Stalnye bashni: proektirovanie i montazh [Steel towers: design and installation]. Kiev. Budivelnik, Soviet Union.
9. Perelmuther A. V. (2021). "Formation and development of key ideas for designing high-rise structures of antenna structures", Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo, no. 1, pp. 10-20. DOI:10.33622/0869-7019.2021.01.10-20.
10. Pilyai A.I. (2022) "Information model for evaluating design solutions in construction", Ekonomika stroitel'stva, no. 6, pp. 98-103.
11. Order of the Government of Moscow "On measures for the placement of equipment for mobile radiotelephone base stations and a contact network on outdoor lighting poles in the city of Moscow" dated April 25, 2023 No. 265-RP [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1301461719>.
12. Sinelshchikov A.V., Ensuring the completeness of accounting for eigenmodes and frequencies in the calculation of structures for seismic resistance, Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2022, no. 1 (39), pp. 52–57, available at: https://aracy.pф/journal/wp-content/uploads/2022/03/isvp_1_39_2022_52-57.pdf (Accessed 15 May 2026). DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-52-57. (In Russian).
13. Sinelshchikov A.V., Zavyalov R.A., Influence of external load on changes in natural frequencies and forms of vibrations of industrial buildings. Part 1, Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 8–13, available at: https://aracy.pф/journal/wp-content/uploads/2023/12/isvp_4_46_2023_8-13.pdf (Accessed 15 May 2026). DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-8-13. (In Russian).
14. Sokolov A. G. (1971), Metallicheskiye konstruksii antenykh ustroystv [Metal structures of antenna devices], Moscow: Stroyizdat, Soviet Union.
15. Cellular communication. History. Standards. Technologies [internet]. Available at: <http://celnet.ru/gal49.php> (Accessed 21 April 2026).
16. Tanasoglo A.V., Bakayev S.N., Volchkov A.N., Bakayeva C.S., Perevarjuha N.A. (2017) "A new design solution of the antenna support for cramped urban conditions", Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, vol. 125, no. 3, pp. 50–54, available at: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/2017-3\(125\)/st_09_tanasoglo_bakaev_volchkov_bakaeva_perevaryuha.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/2017-3(125)/st_09_tanasoglo_bakaev_volchkov_bakaeva_perevaryuha.pdf) (Accessed 21 April 2026). ISSN 2519-2817

17. Taranukha N.L., Novikov M.Yu. (2023) "Improving Designing Efficiency of Antenna-Mast Structures for Cellular Communications Based on Design Solutions Assessment", Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, vol. 26, no. 1, pp. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2023-1-84-90>
18. Amlan Das, Shiva Kumar (2015). "Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines", International Journal of Science and Research, vol. 4, no. 4, pp. 999-1003.
19. Fu X, Li H.N., Li G., Dong Zh.Q., Zhao Mi. (2021) "Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity", Engineering Structures, vol. 233, pp. 111913., available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73311833> (Accessed 21 April 2026). ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.111913.
20. Fu X, Wang J., Li H. N., Li J.X., Yang L.D. (2019) "Full-Scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission Tower under Extreme Wind Loads", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 190, pp. 119-133, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38967402> (Accessed 21 April 2026). ISSN 0167-6105. DOI 10.1016/j.jweia.2019.04.011.
21. Adam, J.M., Parisi, F., Sagasetta, J., and Lu, X. (2018), "Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century", Engineering Structures, vol. 173, pp. 122-149, available at: <https://iranarze.ir/storage/uploads/2019/01/E10800-IranArze.pdf> (Accessed 21 April 2026). DOI 10.1016/J. ENGSTRUCT.2018.06.082.
22. Zheng L., Wang W., Li H. (2022) "Progressive Collapse Resistance of Composite Frame with Concrete Filled Steel Tubular Column under a Penultimate Column Removal Scenario", Journal of Constructional Steel Research, vol. 189, pp. 107085, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58587799> (Accessed 21 April 2026). ISSN 0143-974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107085.

© А. В. Голиков, А. В. Танасогло

Ссылка для цитирования:

Голиков А. В., Танасогло А. В. Напряженно-деформированное состояние опор двойного назначения сплошного сечения с учетом особенностей размещения оборудования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 12-21.

УДК 624.012.45

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-21-26

**АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН
ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ВНЕЦЕНТРОННОГО СЖАТИЯ И КРУЧЕНИЯ:
ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

М. А. Амелина, М. Н. Кузнецов

Амелина Маргарита Андреевна, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (951) 073-26-98; e-mail: AmelinaMA@mgsu.ru;

Кузнецов Михаил Николаевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (985) 441-19-80; e-mail: mk_stars55@mail.ru

В статье выполнен анализ деформирования железобетонных колонн при совместном действии внецентренного сжатия и кручения. Рассмотрены теоретические подходы к расчету, включая пространственные модели трещинообразования и методики определения напряженно-деформированного состояния. Приведены результаты экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов. Показано, что учет кручения существенно влияет на перераспределение усилий и может изменять несущую способность в несколько раз. Установлено, что при сложном нагружении формируются наклонные трещины под углом 22-45°. Проанализированы современные расчетные модели (теория пластичности бетона, МКЭ). Мы разобрали, как процент армирования, размеры и форма сечения, а также свойства бетона влияют на деформации и разрушения конструкций. Сравнили результат российских и зарубежных исследований о проведении железобетонных элементов под сложными нагрузкам. Рассмотрены особенности формирования пространственных трещин, развитие деформации бетона и арматуры, а также влияние крутящего воздействия на перераспределение внутренних усилий в конструктивной системе. Отмечена необходимость совершенствования существующих методов расчета. Полученные результаты могут быть использованы при разработке расчетных моделей и улучшения методов проектирования в строительных условиях. Результаты полезны для проектирования конструкций при сложных силовых воздействиях.

Ключевые слова: железобетонные колонны, внецентренное сжатие, кручение, деформирование, пространственные трещины, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные исследования.

**ANALYSIS OF DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS
UNDER COMBINED ACTION OF ECCENTRIC COMPRESSION AND TORSION:
REVIEW OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES**

M. A. Amelina, M. N. Kuznetsov

Amelina Margarita Andreyevna, Senior Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (951) 073-26-98; e-mail: AmelinaMA@mgsu.ru;

Kuznetsov Mikhail Nikolayevich, student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (985) 441-19-80; e-mail: mk_stars55@mail.ru