



(24)-0416-1

## СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОДНОЦЕПНОЙ ОПОРЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ 10 КВ

Евгений Васильевич Горохов<sup>1</sup>, Владимир Николаевич Васылев<sup>2</sup>,  
Андрей Николаевич Миронов<sup>3</sup>, Анатолий Владимирович Шевченко<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

<sup>1</sup>mk@donnasa.ru, <sup>2</sup>wn1951@mail.ru, <sup>3</sup>a.n.myronov@donnasa.ru, <sup>4</sup>sodr.sharm2017@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы совершенствования статических испытаний стальных опор линий электропередачи. В настоящее время при строительстве линий электропередачи с целью повышения их экономической эффективности используются стальные опоры, изготовленные по индивидуальным проектам. Для утверждения индивидуального проекта опытная опора должна пройти натурные статические испытания на проектные схемы загрузки. Испытания проводятся на специализированных стендах в соответствии с отечественными и зарубежными стандартами с использованием экспериментальных методик исследования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и сооружений. Испытания опоры проводятся в проектном положении. С целью значительных сокращений сроков испытаний и их стоимости, опора была испытана в горизонтальном положении на силовом полу испытательного зала Лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ФГБОУ ВО «ДОННАСА». Испытания были проведены с учетом опыта проведения испытаний железобетонных стоек линий электропередачи. Результаты испытания опытного образца опоры П10ГИ-4М подтвердили ее проектные показатели. Все элементы опоры и узловые соединения в целом выдерживают предельную нагрузку без остаточных (пластических) деформаций.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, стальная опора, статические испытания, натурные испытания, схема загрузки, нормальный и аварийный режим, напряженно-деформированное состояние (НДС)

**Для цитирования:** Статические испытания промежуточной одноцепной опоры высоковольтной линии 10 кВ / Е. В. Горохов [и др.]. // *Металлические конструкции*. 2024. Том 30, № 4. С. 197–214. doi: 10.71536/mc.2024.v30n4.4. edn: xetguw.

Original article

## STATIC TESTS OF AN INTERMEDIATE SINGLE-CIRCUIT SUPPORT OF A 10 KV HIGH-VOLTAGE LINE

Evgenii V. Gorokhov<sup>1</sup>, Vladimir N. Vasylev<sup>2</sup>, Andrey N. Mironov<sup>3</sup>, Anatoly V. Shevchenko<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

<sup>1</sup>mk@donnasa.ru, <sup>2</sup>wn1951@mail.ru, <sup>3</sup>a.n.myronov@donnasa.ru, <sup>4</sup>sodr.sharm2017@gmail.com

**Abstract.** The article discusses the issues of improving static testing of steel poles of power transmission lines. Currently, steel supports made according to individual designs are used in the construction of power transmission lines in order to increase their economic efficiency. To approve an individual project, an experimental support must pass full-scale static tests for design loading schemes. The tests are carried out on specialized stands in accordance with domestic and foreign standards using experimental methods for studying the stress-strain state of building structures and structures. The tests of the support are carried



out in the design position. In order to significantly reduce the testing time and cost, the support was tested in a horizontal position on the power floor of the testing hall of the Laboratory for Testing Building Structures and Structures of the DONNASA Federal State Budgetary Educational Institution. The tests were carried out taking into account the experience of testing reinforced concrete racks of power transmission lines. The test results of the prototype of the P10GI-4M support confirmed its design performance. All support elements and nodal joints as a whole withstand the maximum load without residual (plastic) deformations.

**Keywords:** power transmission line, steel support, static tests, field tests, loading scheme, normal and emergency mode, stress-strain state

**For citation:** Static tests of an intermediate single-circuit support of a 10 kV high-voltage line / E. V. Gorokhov [et al.]. *Metal Constructions*. 2024;30(4): 197–214. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2024.v30n4.4. edn: xetguw.

### Формулировка проблемы

В соответствии с [4; 5] ставится задача восстановления линий электропередач и электросетевых конструкций в районах ДНР, пострадавших вследствие боевых действий. При строительстве линий электропередачи с целью повышения их экономической эффективности используются стальные опоры, изготовленные по индивидуальным проектам. Для утверждения индивидуального проекта опытная опора должна пройти натурные статические испытания на проектные схемы загрузки. Испытания опоры проводятся в проектном положении на специализированных стендах в соответствии с отечественными и зарубежными стандартами с использованием экспериментальных методик исследования НДС строительных конструкций и сооружений.

С целью значительных сокращений сроков испытаний и их стоимости, испытания опоры возможно выполнить в горизонтальном положении на силовом полу испытательного стенда с созданием проектных усилий как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

### Анализ исследований и публикаций

Вопросы долговечности стальных опор линий электропередач рассмотрены в работах [8; 11; 12]. В работах [9; 10; 15; 18; 19] рассмотрены вопросы сбора ветровых и гололедных нагрузок на элементы опор. В работе [12] рассмотрены причины аварий линии электропередачи, в том числе от действия ветровых и гололедных нагрузок.

### Описание объекта исследований

Стальная промежуточная одноцепная опора типа П10ГИ-4М линии напряжением  $U = 10$  кВ вы-

полнена из горячекатаных равнополочных стальных уголков. Геометрическая схема опоры представлена на рисунке 1, а сечения основных расчетных стержней указаны в таблице 1.

Опора болтовая, за исключением некоторых сварных узлов – опорных баз и узлов оголовка в зоне примыкания траверсы. Ствол опоры имеет квадратное поперечное сечение с размерами  $500 \times 500$  мм и прямолинейные пояса без перегибов из уголков L63×5 (нижняя секция) и L50×4 (верхняя секция). Решетка ствола выполнена треугольной из уголков L45×4 (опорные раскосы) и L40×3. Материал элементов опоры – сталь С245 (ВСтЗ). Траверса выполнена из гнутосварного замкнутого профиля/профильной трубы прямоугольного сечения  $120 \times 80 \times 4$  мм, которая приваривается меньшей нижней полкой к опорным уголкам оголовка ствола.

### Цель исследований

Целью исследований является:

- проверка экспериментальным путем несущей способности элементов и ствола опоры П10ГИ-4М в целом от расчетных нагрузок;
- определение горизонтальных и вертикальных перемещений верха ствола опоры на соответствие требованиям второй группы предельных состояний.

### Основной материал

#### 1. Исходные данные

Все исходные данные, необходимые для расчета, проектирования, оценки НДС основных элементов и проведения механических испытаний промежуточной опоры П10ГИ-4М были взяты на основании Технического задания,

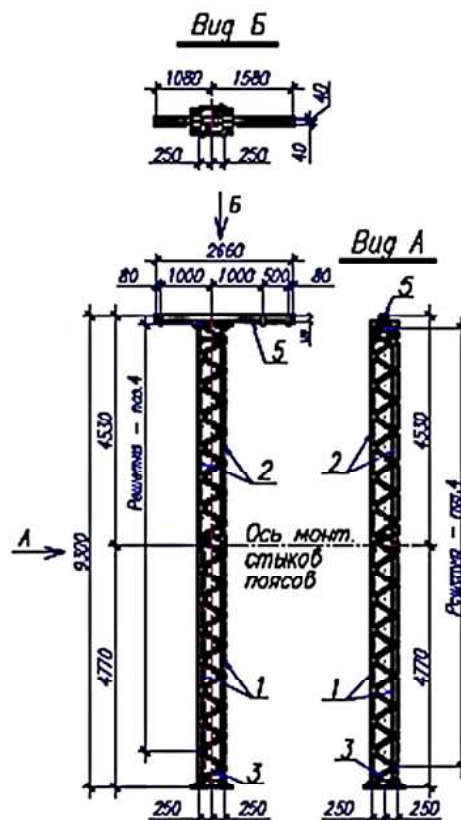
разработанного Заказчиком, и норм проектирования [1]:

- тип местности – В;
- район по гололеду – V, с нормативным значением толщины стенки гололеда 30 мм;
- район по ветру – V, с нормативным значением ветрового напора  $W_0 = 1\ 000$  Па;
- нормативное значение ветрового напора при учете гололеда на гибкие элементы (токоведущие провода),  $W_0 = 102$  Па;

- нормативное значение ветрового напора при учете гололеда на конструктивные элементы опоры (пояса и решетку) в соответствии с [1],  $W_0 = 600$  Па;
- температура воздуха при гололеде  $T_1 = -5$  °С;
- минимальная температура воздуха  $T_{\min} = -34$  °С;
- максимальная температура воздуха  $T_{\max} = +39$  °С;
- средняя эксплуатационная температура  $T_{\text{эсп}} = +8$  °С;
- температура воздуха при грозе  $T_{\text{гр}} = +15$  °С;

**Таблица 1.** Жесткостные параметры/поперечные сечения основных элементов промежуточной опоры П10ГИ-4М

№ Типа жесткости	Наименование элемента/стержня	Сечение
1	Пояса нижней секции (от заделки до оси стыка)	└63×5
2	Пояса верхней секции (от оси стыка до верха ствола)	└50×4
3	Опорные раскосы	└45×4
4	Рядовые раскосы	└40×3
5	Траверса	Профильная труба гн. 120×80×4



**Рисунок 1.** Геометрическая схема опоры П10ГИ-4М: 1 – пояса нижней секции; 2 – пояса верхней секции; 3 – опорные раскосы; 4 – решетка ствола опоры; 5 – траверса.

– температура воздуха при максимальном ветре  $T_{\text{вет}} = 0^\circ\text{C}$ .

Схемы загрузки промежуточной опоры П10ГИ-4М, разработанные Заказчиком, представлены на рисунке 2.

Ветровая нагрузка на ствол опоры определялась в соответствии с разделом 11.1 СП «Нагрузки и воздействия» [1]. На предварительном этапе была построена пространственная стержневая конечно-элементная (КЭ) модель опоры в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016», и выполнен динамический расчет (модальный анализ) с определением периодов и частот собственных колебаний опоры с массами, состоящими из: собственного веса элементов опоры, веса электрического оборудования (проводов, изоляторов, подвесок и т. п.), а также веса гололеда на токоведущих проводах.

По результатам модального анализа была собрана пульсационная составляющая ветровой нагрузки и суммарная ветровая нагрузка на ствол опоры при учете и без учета гололеда. Итоговые схемы загрузки ствола опоры от суммарной расчетной ветровой нагрузкой приведены на рисунке 3.

## 2. Статический расчет опоры

Статический расчет модели опоры выполнялся с использованием программного комплек-

са «ЛИРА-САПР 2016» при упругой работе материала. Расчетной схемой являлась пространственная система, моделированная стержневыми конечными элементами (КЭ) № 10. Количество типов жесткостей в расчетной модели – 5 шт. (таблица 1).

Для определения расчетных усилий и анализа НДС в основных несущих элементах опоры, создавались расчетные сочетания нагрузок (РСН), которые приводятся в таблице 2.

Конечно-элементная расчетная модель промежуточной опоры П10ГИ-4М содержит 108 узлов и 243 стержневых элемента (рисунок 4). Значения расчетных усилий (продольных сил и изгибающих моментов), а также наибольших нормальных напряжений с запасами несущей способности в основных стержнях опоры представлены в таблице 3. Расчет несущей способности элементов опоры производился по нормам [2].

## 3. Описание нагрузочных устройств и измерительных приборов

При проведении испытаний промежуточной опоры типа П10ГИ-4М применялись следующие устройства, создающие нагрузку:

- механическая таль с ручным приводом грузоподъемностью  $Q = 5$  т, имитирующая горизонтальную нагрузку от обрыва фазного провода из плоскости траверсы (вдоль ВЛ) – рисунок 5, а;

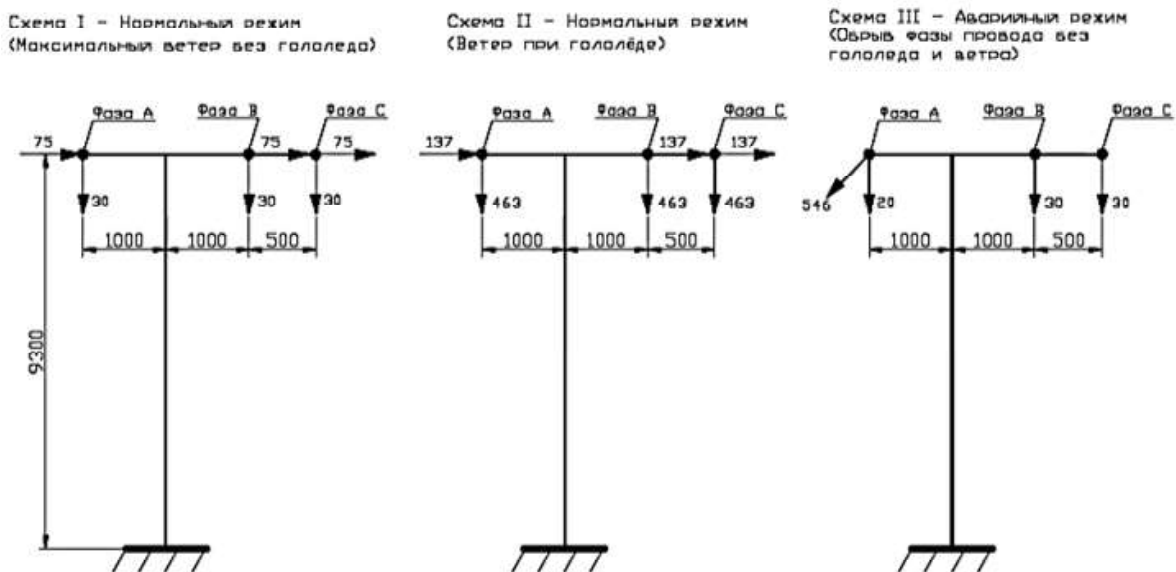


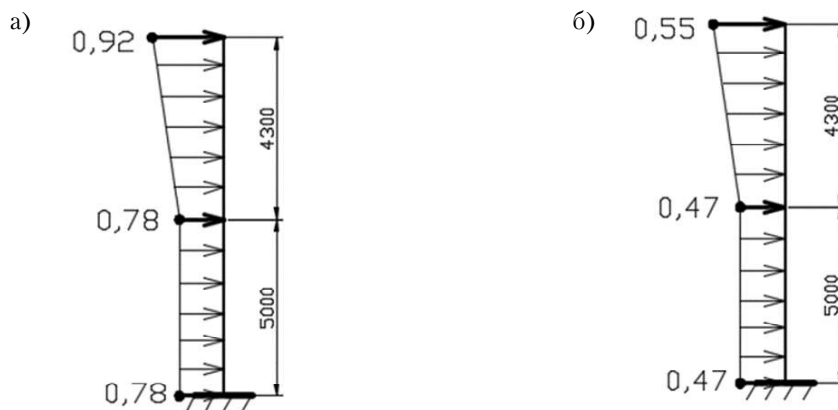
Рисунок 2. Основные схемы загрузки промежуточной опоры П10ГИ-4М (нагрузки указаны в кг, размеры в мм).

- две механические тали с ручным приводом грузоподъемностью  $Q = 1$  т каждая, имитирующие вертикальные нагрузки вдоль ствола опоры от веса токоведущих проводов, изоляторов и гололеда на них – рисунок 5, б;
- опорный кронштейн с отводным блоком, тросом и чугунными тарированными грузами весом  $P = 22$  кгс каждый, имитирующие горизонтальную ветровую нагрузку на ствол опоры поперек ВЛ – рисунок 5, в;
- опорная балка с отводным блоком, тросом, корзиной для грузов и чугунными тарирован-

ными грузами весом  $P = 22$  кгс каждый, имитирующие горизонтальную ветровую нагрузку на траверсу опоры (поперек ВЛ) – рисунок 5, г.

При проведении испытаний использовались следующие измерительные приборы:

- механический динамометр типа ДПУ-10-2 по ГОСТ 13837-68 с ценой одного деления  $C = 100$  кгс, на левой стороне относительно оси ствола опоры (рисунок 6, а);
- механический динамометр типа ДПУ-2-2 по ТУ 25-06.2082-83 с ценой одного деления

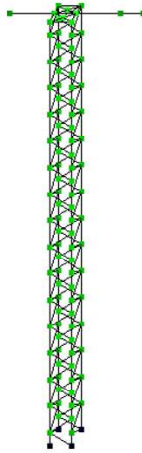


**Рисунок 3.** Схемы загрузки ветровой нагрузкой ствола опоры (нагрузки указаны в кН, размеры в мм): а) максимальный ветер; б) ветер при гололеде.

**Таблица 2.** Нагрузки, учитываемые в расчетных сочетаниях, и их коэффициенты

№№ загрузений	Наименование нагрузок	Коэфф. сочетаний нагрузок, $\psi$	Нагрузки, вошедшие в расчетное сочетание		
			РСН 1	РСН 2	РСН 3
1	Постоянная от собственного веса металлических конструкций опоры	1,0	+	+	+
2	Схема № I. Нормальный режим. Максимальный ветер без гололеда	1,0	+	–	–
3	Схема № II. Нормальный режим. Ветер при гололеде	1,0	–	+	–
4	Схема № III. Аварийный режим. Обрыв фазного провода без гололеда и ветра	1,0	–	–	+
5	Ветровая на ствол опоры вдоль оси траверсы (поперек линии)	1,0	+	+	–

1. Коэффициент надежности для постоянной нагрузки от собственного веса конструкций опоры принят равным  $\gamma_f = 1,05$ ;  
 2. Коэффициенты надежности по нагрузкам №№ 2...5 приняты равными  $\gamma_f = 1,0$ .



**Рисунок 4.** Пространственная расчетная модель промежуточной опоры П10ГИ-4М в ПК «ЛИРА-САПР 2016».

- С = 20 кгс, на правой стороне относительно оси ствола опоры (рисунок 6, б);
- прогибомер ПАО-6 с ценой деления С = 0,01 мм на правом конце траверсы для измерения вертикальных перемещений траверсы – П1 (рисунок 6, в);
- прогибомер ПАО-6 с ценой деления С = 0,01 мм на правом конце траверсы для измерения горизонтальных перемещений траверсы – П2 (рисунок 6, в);
- индикаторы часового типа (И1, И2) с ценой деления С = 0,01 мм для измерения горизонтальных деформаций опорной плиты базы ствола опоры (рисунок 6, г).

Механические динамометры ДПУ-10-2 и ДПУ-2-2 перед испытаниями проходили тарировку с использованием 10 т образцового динамометра растяжения.

Схема размещения измерительных приборов относительно ствола опоры приведена на рисунке 7.

#### **4. Описание конструктивного решения испытательного стенда**

Для проведения испытаний опора типа П10ГИ-4М была изготовлена в натуральную величину. Испытания опоры проводились в горизонтальном положении на силовом полу лабораторного корпуса кафедры «Металлических конструкций и сооружений» ФГБОУ ВО «Дон-НАСА».

Схема испытания опоры при нормальном режиме эксплуатации (Схема II на рисунке 2) приведена на рисунке 8.

Основание/база ствола опоры (поз. 1) жестко закрепляется на вертикальной опорной тумбе (поз. 3). Опорная тумба имитирует жесткое закрепление/заделку ствола в основании. Продольная ось ствола опоры располагается на высоте 730 мм от уровня силового пола. Крепление опорной тумбы к железобетонному силовому полу производится анкерными болтами и приваркой нижних металлических кромок тумбы к ручьям силового пола. В зоне верхней секции нижняя плоскость ствола опоры опирается на подвижную опору в горизонтальном направлении, состоящую из деревянных брусьев. На расстоянии 6,3 м от заделки с двух сторон ствола установлены силовые П-образные рамы (поз. 4, рисунок 8 – вид 1-1), на которые создается натяжение/создание нагрузки (силы  $G_1$  и  $G_2$ ) вдоль ствола опоры. Ширина/пролет рам составляет 1,0 м, равная расстоянию между ручьями силового пола. Закрепление силовых рам (поз. 4) от горизонтального смещения и изгиба в их основании производится приваркой их нижних кромок к ручьям силового пола. Высота рам от уровня силового пола составляет 780 мм.

Нагрузка вдоль ствола опоры (силы  $G_1$  и  $G_2$ ) создается в горизонтальном направлении двумя механическими таями с ручным приводом (поз. 6) грузоподъемностью  $Q = 1\,000$  кгс каждая. Один конец тали закрепляется крюком к ригелю П-обр. силовых рам (поз. 4), а второй конец через цепь и динамометр к траверсе опоры (поз. 2). На левой стороне траверсы, таль (поз. 6) и динамометр ДПУ-10-2 (поз. 7) прикреплены через

Таблица 3. Несущая способность основных элементов опоры П10ГИ-4М

Элемент	Расчетные усилия		Сечение	Геометрические характеристики сечения		Коэфф. прод. изгиба $\phi$	$\sigma$ , МПа	$R_y \cdot \gamma_c$ МПа
	Продольная сила, N, кН	Изгиб. момент, M, кН·м		A, см <sup>2</sup>	$W_{min}$ , см <sup>3</sup>			Запас $\Delta$ , %
Пояса нижней секции	-80,1	0,36	L63x5	6,13	5,07	0,804	233,5	240 (2,7 %)
Пояса верхней секции	-39,5	0,14	L50x4	3,89	2,54	0,732	193,8	240 (19,3 %)
Опорные раскосы	-14,7	-	L45x4	3,48	-	0,692	61,1	180 (66,1 %)
Рядовые раскосы	-14,7	-	L40x3	3,08	-	0,631	75,6	180 (58,0 %)
Траверса	-	$M_x = 11,6$	Гн. 120x80x4	-	$W_x = 49,02$	-	236,6	240 (1,4 %)
		$M_x = 0,81$ $M_y = 8,2$			$W_y = 39,3$			225,2

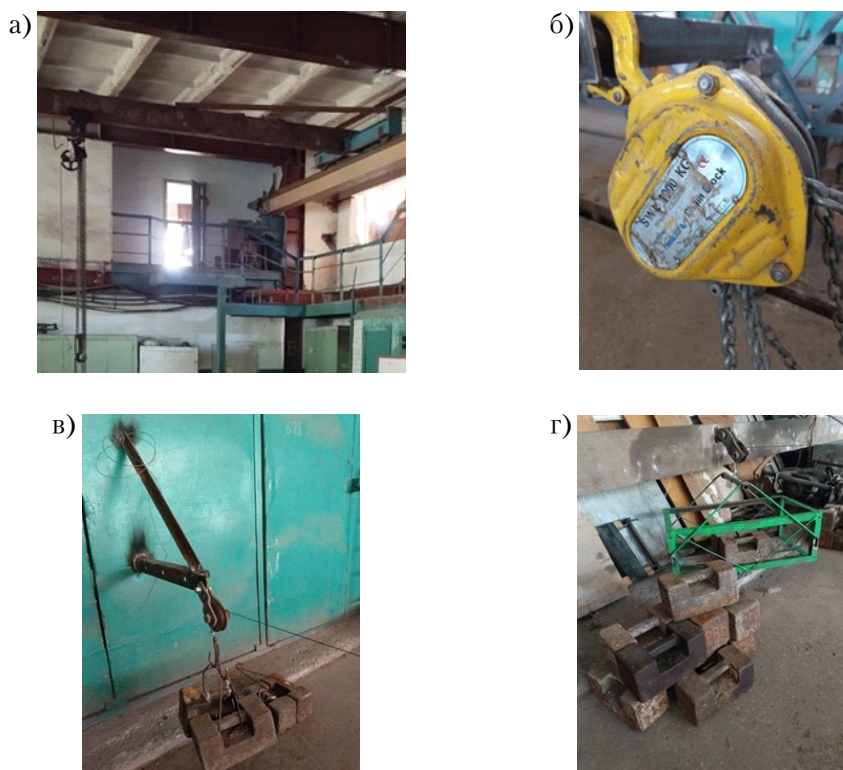
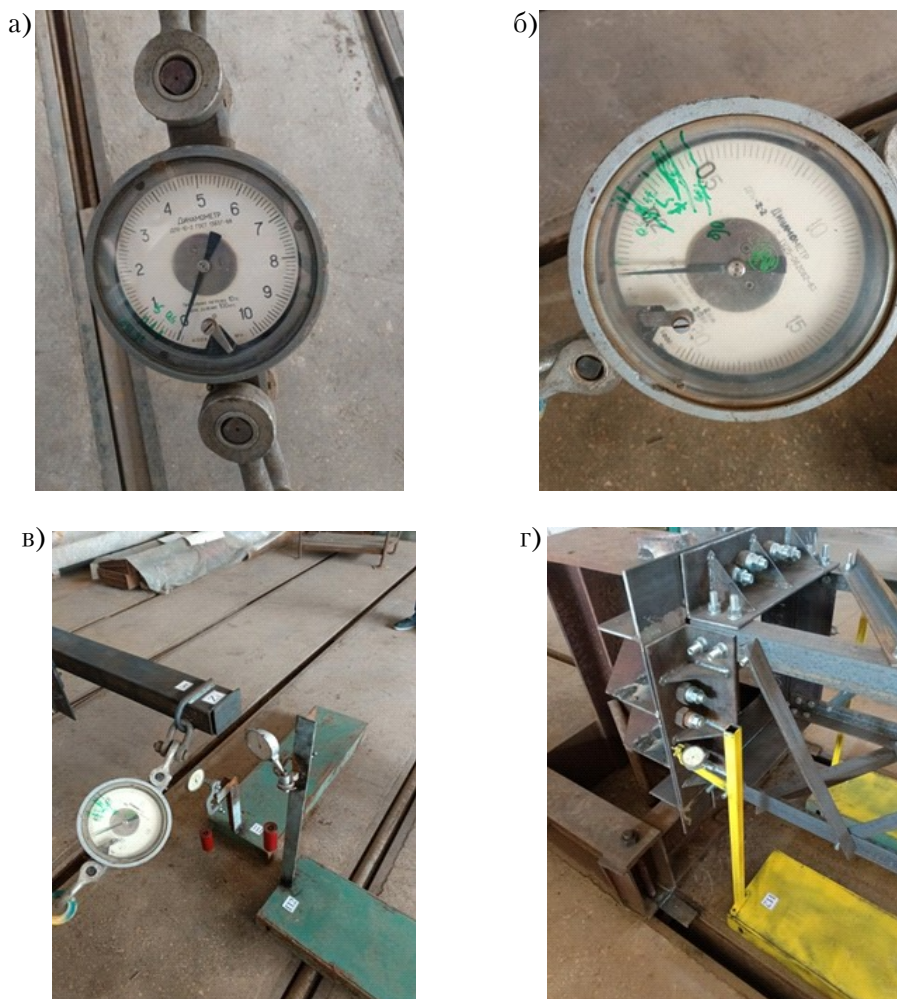


Рисунок 5. Нагрузочные устройства: а) таль г/п 5 т с ручным приводом; б) таль г/п 1 т с ручным приводом (поз. 4); в) опорный кронштейн (поз. 10) с отводным блоком и тросом; г) опорная балка с отводным блоком (поз. 9).



**Рисунок 6.** Измерительные приборы, применяемые при испытаниях: а) динамометр типа ДПУ-10-2 с ценой деления  $C = 100$  кгс (поз. 7); б) динамометр типа ДПУ-2-2 с ценой деления  $C = 20$  кгс (поз. 8); в) прогибомеры ПАО-6 (П1 и П2) с ценой деления  $C = 0,01$  мм; г) индикаторы часового типа (И1, И2) с ценой деления  $C = 0,01$  мм.

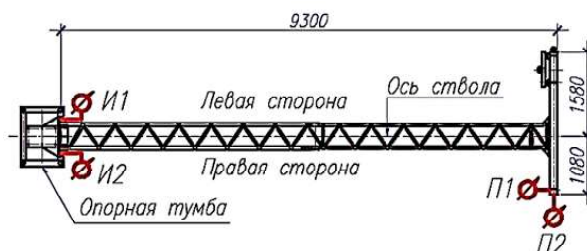
распределительную траверсу (поз. 5) к опорным скобам крепления фазных токоведущих проводов, расстояние между которыми 500 мм. На правой стороне траверсы, таль (поз. 6) и динамометр ДПУ-2-2 (поз. 8) прикреплены непосредственно к опорной скобе траверсы. Расстояния от оси ствола опоры до точек приложения горизонтальных нагрузок к траверсе (поз. 2) составляет: на левой стороне – 1,25 м, на правой – 1,0 м.

Горизонтальная нагрузка, действующая перпендикулярно оси ствола опоры, имитирует ветер вдоль траверсы (поперек ВЛ), и прикладывается:

- к левому концу траверсы (сила  $W_1$ ) через приваренную к торцу траверсы проушину и далее через скобу и трос, переброшенный че-

- рез отводной блок (поз. 9) – рисунок 8 (вид Б-Б). Отводной блок закреплен на опорной силовой балке, располагаемой параллельно силовому полу. Ко второму концу нагрузочного троса подвешивается корзина с чугунными грузами весом  $P = 22$  кгс каждый – поз. 11 (рисунок 5, г, рисунок 8 – вид Б-Б);
- в зоне монтажного стыка двух секций поясов (сила  $W_2$ ) к стволу через нагрузочный трос, который далее идет на отводной блок опорного кронштейна (поз. 10). Ко второму концу нагрузочного троса подвешиваются чугунные грузы весом  $P = 22$  кгс каждый – поз. 12 (рисунок 5, в). Данная нагрузка имитирует равнодействующую ветрового воздействия на ствол опоры.





**Рисунок 7.** Схема размещения измерительных приборов: И1, И2 – индикаторы часового типа для измерения горизонтальных деформаций базы ствола опоры; П1 – прогибомер ПАО-6 для измерения вертикальных перемещений (из плоскости траверсы); П2 – прогибомер ПАО-6 для измерения горизонтальных перемещений (в плоскости траверсы).

Схема испытания опоры при аварийном режиме эксплуатации (Схема III – обрыв фазного провода) приведена на рисунке 9.

Нагрузка на траверсу опоры от обрыва фазного провода имитировалась созданием вертикального усилия  $T$  на правый конец траверсы (поз. 2) с привязкой 1,0 м от оси ствола. Вертикальное усилие  $T$  создавалось механической талью г/п  $Q = 5$  т через динамометр ДПУ-2-2 (поз. 8) – рисунок 10, д.

Общий вид экспериментальной установки приведен на рисунке 10.

### 5. Программа испытаний опоры типа П10ГИ-4М

Испытания опоры проводились по двум основным схемам нагружения:

- 1-я схема – нормальный режим (ветер с гололедом/Схема II);
- 2-я схема – аварийный режим (обрыв фазного провода/Схема III).

Схема I нормального режима (рисунок 1) не учитывалась, так она создает меньший нагрузочный эффект по сравнению со Схемой II.

Нагрузка по двум схемам испытания прикладывалась к стволу и траверсе опоры ступенями в долях от расчетной нагрузки: 25, 50, 75, 90, 95, 100 %, – всего 6 ступеней нагружения.

Предельная нагрузка рассчитывалась с учетом коэффициента надежности по материалу, равного 1,025.

После приложения нагрузки по каждой ступени, опора выдерживалась в течение не менее 5 минут для стабилизации деформаций, после чего снимались показания по измерительным приборам: П1, П2, И1 и И2. Величины нагрузок по ступеням нагружения для 1-й и 2-й схем приведены соответственно в таблицах 4 и 5. Снятие показаний

по измерительным приборам производилось до нагрузки 90 % (включительно) от расчетной.

### 6. Результаты испытаний

По данным измерений вертикальных и горизонтальных перемещений – были построены графики зависимости перемещений от уровня приложенных к опоре нагрузок для двух основных схем (рисунки 11–14).

### Выводы

1. Несущая способность промежуточной опоры П10ГИ-4М по результатам испытаний – обеспечивается. Отдельные элементы и ствол опоры в целом выдерживают предельную нагрузку в 100 %.
2. После полного снятия нагрузки (до 0 %), остаточных (пластических) деформаций в элементах ствола и траверсы опоры не обнаружено. Болтовые соединения не разрушены, деформаций смятия металла в зонах отверстий под болты и срезов болтов не обнаружено. Потери местной и общей устойчивости элементов и ствола опоры (искривления) не обнаружено.
3. Зависимость горизонтальных и вертикальных перемещений верха ствола опоры от прикладываемой нагрузки – нелинейная, что связано с податливостью одноузловых болтовых соединений решетки с поясами и незначительными деформациями/углами поворота базы ствола опоры.
4. Наибольшее горизонтальное перемещение ствола опоры для 1-й схемы нагружения (ветер с гололедом) при 90 % от предельной



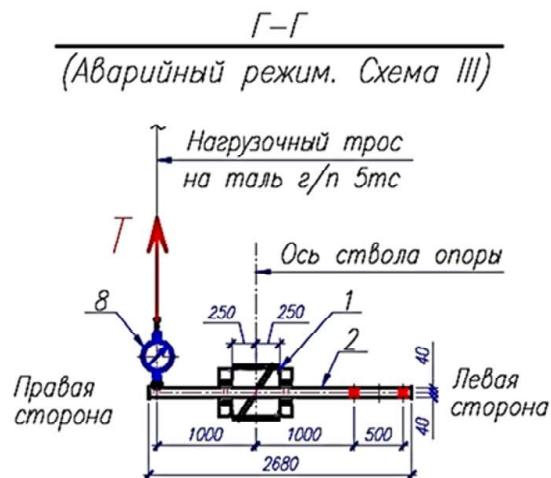
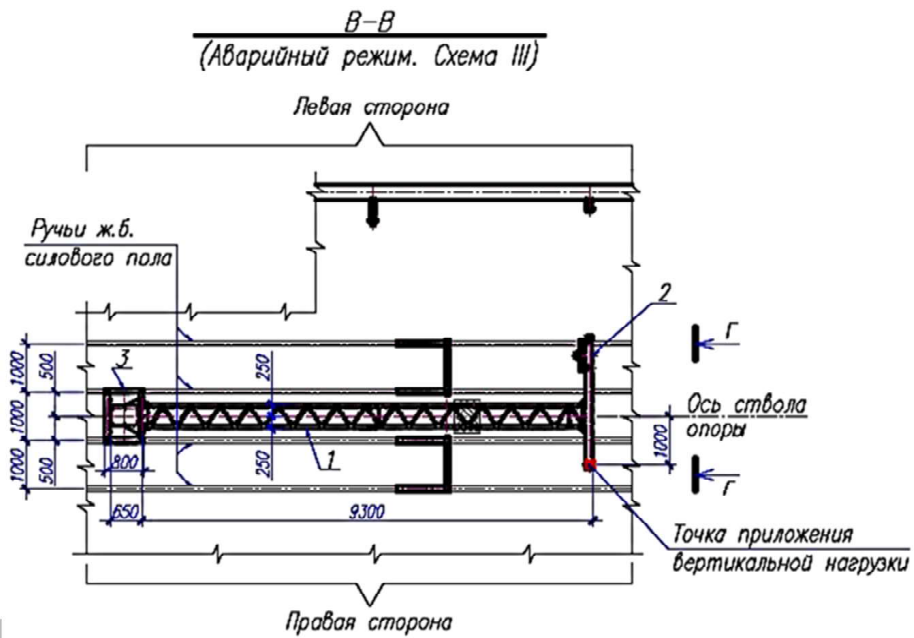
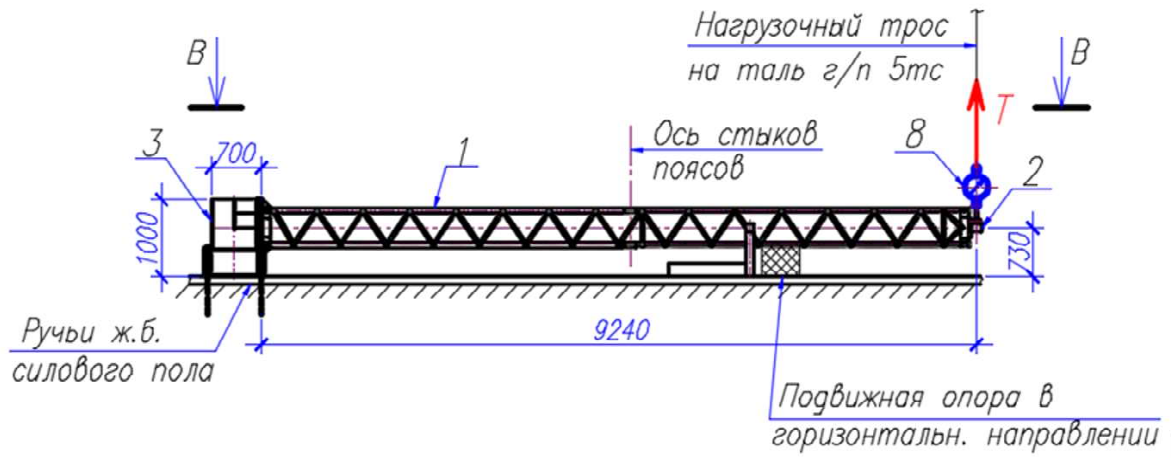


Рисунок 9. Схема испытательного стенда при аварийном режиме эксплуатации опоры (Схема III).



**Рисунок 10.** Общий вид экспериментальной установки при испытаниях опоры типа П10ГИ-4М: а, б) общий вид испытуемой опоры с силовыми рамами, установленными на силовом полу с ручьями; в) конструкция опорной тумбы (поз. 3) для жесткого закрепления базы опоры; г) распределительная траверса с закрепленным на ней динамометром ДПУ-10-2, передающая нагрузку на опорные скобы крепления 2-х фазных проводов; д) испытания опоры при аварийном режиме (Схема III) – загрузка правого конца траверсы вертикальным тяговым усилием  $T$  (рисунок 9, вид Г-Г) от механической тали г/п  $Q = 5$  т.

**Таблица 4.** Величины нагрузок по ступеням нагружения для 1-й схемы. Нормальный режим – ветер с гололедом

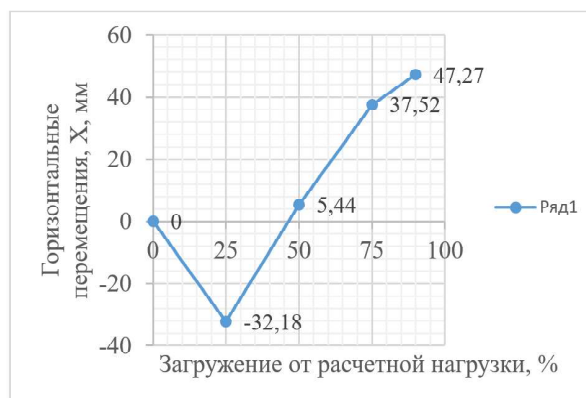
Степень нагружения	1	2	3	4	5	6
Доля нагрузки от расчетной, %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %
$G_1$ , кгс	232	463	695	833	880	926
$G_2$ , кгс	116	232	347	417	440	463
$W_1$ , кгс	103	206	308	370	390	411
$W_2$ , кгс	114	227	341	409	431	454

**Таблица 5.** Величины нагрузок по ступеням нагружения для 2-й схемы. Аварийный режим – обрыв фазного провода

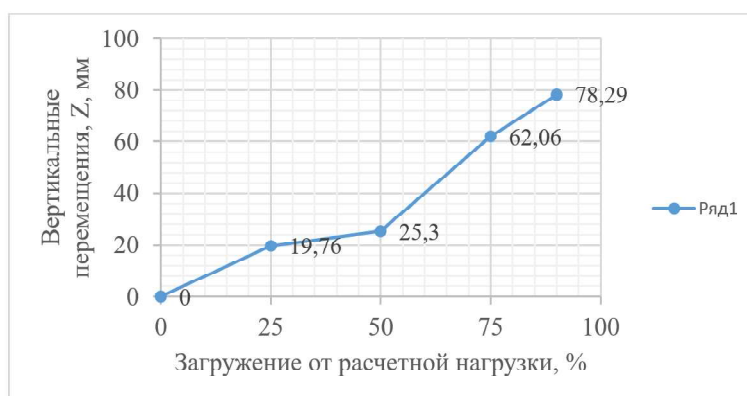
Степень нагружения	1	2	3	4	5	6
Доля нагрузки от расчетной, %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %
$T$ , кгс	137	273	410	492	519	546



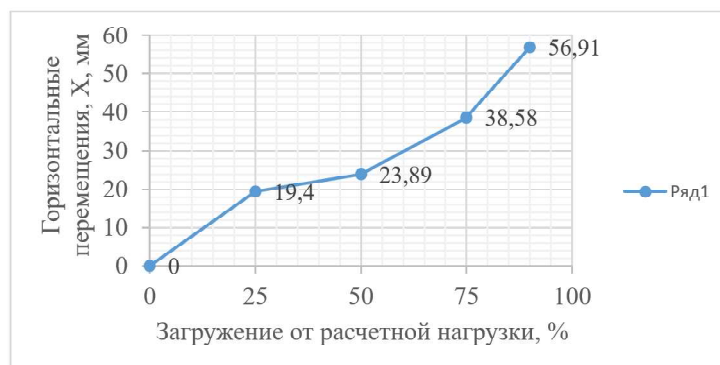
**Рисунок 11.** Нормальный режим/Ветер с гололедом (1-я схема нагружения). Зависимость вертикальных перемещений на правом конце траверсы от уровня прикладываемой к опоре нагрузки.



**Рисунок 12.** Нормальный режим/Ветер с гололедом (1-я схема нагружения). Зависимость горизонтальных перемещений траверсы от уровня прикладываемой к опоре нагрузки.



**Рисунок 13.** Аварийный режим/Обрыв фазного провода (2-я схема нагружения). Зависимость вертикальных перемещений на правом конце траверсы от уровня прикладываемой к опоре нагрузки.



**Рисунок 14.** Аварийный режим/Обрыв фазного провода (2-я схема нагружения). Зависимость горизонтальных перемещений траверсы от уровня прикладываемой к опоре нагрузки.

нагрузки составляет  $X_{\text{экс}} = 47,27$  мм. Прогнозируемое горизонтальное перемещение ствола при 100 % нагрузке составит  $X_{\text{экс}} = 52,52$  мм.

Предельно допустимое горизонтальное перемещение верха ствола по нормам [1]:  $X_{\text{пред}} = [H/100] = 93$  мм.

Таким образом, требования второй группы предельных состояний для нормального режима эксплуатации опоры выполняются, запас несущей способности составляет  $\Delta = 43,5$  %.

5. Наибольшее горизонтальное перемещение ствола опоры для 2-й схемы нагружения (ава-

рийный режим от обрыва фазного провода) при 90 % от предельной нагрузки составляет  $Y_{\text{экс}} = 78,29$  мм. Прогнозируемое горизонтальное перемещение ствола при 100 % нагрузке составит  $Y_{\text{экс}} = 86,99$  мм.

Предельно допустимое горизонтальное перемещение верха ствола по нормам [1]:  $Y_{\text{пред}} = 93$  мм. Экспериментальный прогиб верха ствола при аварийном режиме меньше предельно допустимого. Требования второй группы предельных состояний для аварийного режима эксплуатации опоры выполняются, запас несущей способности составляет  $D = 6,5$  %.

#### Список источников

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия = Loads and actions : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. : взамен СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85» : дата введения 2017-06-04 / исполнители ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 110 с. – Текст : непосредственный.

#### References

1. SP 20.13330.2016. Loads and actions : approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Ministry of Construction of the Russian Federation) dated December 3, 2016 № 891/pr and put into effect on June 4, 2017 : instead of SP 20.13330.2011 «SNiP 2.01.07-85» : date of introduction 2017-06-04 / the performers of the V. A. Kucherenko Central Research Institute of Construction JSC with the participation of the Federal State Budgetary Institution «Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov». –

2. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции = Steel structures : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр и введен в действие с 28 августа 2017 г. : актуализированная редакция СНиП II-23-81\* : дата введения 2017-08-28 / разработан АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, МГСУ, СПбГАСУ. – Москва : Минстрой России, 2017. – 151 с. – Текст : непосредственный.
3. Российская Федерация. Постановление. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Восстановление и социально-экономическое развитие Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской области и Херсонской области» : Постановление Правительства Российской Федерации № 2255 от 22 декабря 2023 г. – Текст : электронный // Правительство Российской Федерации : официальный сайт. – 2023. – URL: <http://government.ru/docs/all/151710/> (дата обращения: 16.10.2024).
4. Донецкая Народная Республика. Постановление. Об утверждении подпрограммы «Восстановление распределительных сетей Донецкой Народной Республики» : Постановление Правительства Донецкой Народной Республики № 77-2 от 14 сентября 2023 г. – Текст : электронный // Правительство Донецкой Народной Республики : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://prav-dnr.ru/npa/postanovlenie-pravitelstva-doneczkoj-narodnoj-respubliki-ot-14-sentyabrya2023-g-%E2%84%96-77-2-ob-utverzhenii-podprogrammy-vosstanovlenie-raspredelitelnyh-setej-doneczkoj-narodnoj-respu/> (дата обращения: 16.10.2024).
5. Российская Федерация. Приказы. Об утверждении глав правил устройства электроустановок (вместе с «Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) : издание седьмое : Раздел 2. Передача электроэнергии. Главы 2.4, 2.5») : Приказ Минэнерго России : утверждён 20.05.2003 № 187 : дата введения 2003-10-01. – Текст : электронный // Кодификация.РФ : [сайт]. – 2003. – URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minenergo-Rossii-ot-20.05.2003-N-187/> (дата обращения: 16.10.2024).
6. ГОСТ Р ИСО 12494-2016. Основы проектирования строительных конструкций. Определение гололедных нагрузок = Fundamentals of the design of building structures. Determination of icy loads : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2016 г. № 1815-ст : введен впервые : дата введения 2017-05-01 / подготовлен Акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»), Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций им. В. А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко). – Москва : Стандартинформ, 2016. – 49 с. – Текст : непосредственный.
- Moscow : Standartinform, 2016. – 110 p. – Text : direct. (in Russian)
2. SP 16.13330.2017. Steel structures : official publication : approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation № 126/pr of February 27, 2017 : date of introduction 2017-08-28 / developed by JSC «Research Center «Construction» – V. A. Kucherenko Central Research Institute of Steel Structures, Moscow State University of Civil Engineering, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. – Moscow : Ministry of Construction of Russia, 2017. – 151 p. – Text : direct. (in Russian)
3. Russian Federation. Resolution. On approval of the state program of the Russian Federation «Restoration and socio-economic development of the Donetsk People's Republic, Lugansk People's Republic, Zaporizhia region and Kherson region» : Resolution of the Government of the Russian Federation № 2255 of December 22, 2023. – Text : electronic // Government of the Russian Federation : official site. – 2023. – URL: <http://government.ru/docs/all/151710/> (date of access: 16.10.2024). (in Russian)
4. Donetsk People's Republic. Resolution. On approval of the subprogram «Restoration of distribution networks of the Donetsk People's Republic» : Resolution of the Government of the Donetsk People's Republic № 77-2 of September 14, 2023. – Text : electronic // Government of the Donetsk People's Republic : official site. – 2023. – URL: <https://pravdnr.ru/npa/postanovlenie-pravitelstvadoneczkoj-narodnoj-respubliki-ot-14-sentyabrya2023-g-%E2%84%96-77-2-ob-utverzhenii-podprogrammy-vosstanovlenie-raspredelitelnyh-setej-doneczkoj-narodnoj-respu/> (date of access: 16.10.2024). (in Russian)
5. Russian Federation. Orders. On approval of chapters of the rules for the installation of electrical equipment (together with the «Rules for the Installation of Electrical Equipment (PUE)»: seventh edition: Section 2. Electricity Transmission. Chapters 2.4, 2.5»): Order of the Ministry of Energy of Russia: approved on 20.05.2003 № 187: date of introduction 2003-10-01. – Text : electronic // Codification.RF : [website]. – 2003. – URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minenergo-Rossii-ot-20.05.2003-N-187/> (date of access: 16.10.2024).
6. GOST R ISO 12494-2016. Fundamentals of the design of building structures. Determination of icy loads : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology № 1815-st of November 28, 2016 : introduced for the first time : date of introduction 2017-05-01 / prepared by the Joint Stock Company «Scientific Research Center «Stroitelstvo» (JSC «SIC «Stroitelstvo») – Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko (TSNIISK named after V. A. Kucherenko). – Moscow : Standartinform, 2016. – 49 p. – Text : direct. (in Russian)

7. Шевченко, Н. Ю. Повышение эффективности работы воздушных линий электропередачи, работающих в экстремальных метеоусловиях / Н. Ю. Шевченко, Ю. В. Лебедева, Г. Г. Угаров. – Текст : непосредственный // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1. – С. 119–123.
8. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим ; под общей редакцией Е. В. Горохова и М. И. Казакевича. – Донецк : [б. и.], 2000. – 336 с. – Текст : непосредственный.
9. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим ; под общей редакцией Е. В. Горохова. – Донецк : [б. и.], 2005. – 348 с. – Текст : непосредственный.
10. Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, С. Н. Шаповалов, Е. И. Удод ; под общей редакцией Е. В. Горохова. – Киев : Техника, 1997. – 284 с. – ISBN 966-575-001-1. – Текст : непосредственный.
11. Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС крымской электроэнергетической системы НЭК «Укрэнерго» / Е. В. Горохов, С. Н. Бакаев, Я. В. Назим [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2010. – Том 16, № 2. – С. 75–92. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2010-2/01\\_gorohov\\_bakaev\\_nazim\\_morgaj\\_popov.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-2/01_gorohov_bakaev_nazim_morgaj_popov.pdf) (дата обращения: 16.10.2024). – ISSN 1993-3517.
12. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные требования = Reliability of building structures and foundations : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно исследовательский центр «Строительство» (ОАО «НИЦ «Строительство»), Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В. А. Кучеренко. – Москва : Стандартинформ, 2015. – Текст : непосредственный.
13. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines : International standard : This International Standard was approved by CEN on October 2021. – Geneva : Switzerland : [s. n.]. – 2002. – 186 p. – Текст : непосредственный.
14. SN-NS 3491-4. Design of structures : International standard : Design actions – Part 4 : Wind loads : This International Standard was approved by CEN on May 2002. – Bochum (Germany) : [s. n.]. – 2000. – 7 p. – Текст : непосредственный.
15. ENV 1991-2-5:1997. Eurocode 1: Bases de calcul et actions sur les structures. Part 2-5: Actions on structures – thermal actions : This Irish Standard was published under the authority of the National Standards Authority of Ireland and comes into effect on : 30 June 1998. – Brussels : NSAI, 1997. – P. 7. – Текст : direct.
7. Shevchenko, N. Y.; Lebedeva, Y. V.; Ugarov, G. G. Improving the efficiency of overhead power transmission lines operating in extreme weather conditions. – Text : direct. – In: *Bulletin of the Saratov State Technical University*. – 2011. – № 1. – P. 119–123. (in Russian)
8. Gorokhov, E. V.; Kazakevich, M. I.; Shapovalov, S. N.; Nazim, Ya. V. Aerodynamics of electric grid structures ; under the general editorship of E. V. Gorokhov and M. I. Kazakevich. – Donetsk : [s. n.], 2000. – 336 p. – Text : direct. (in Russian)
9. Gorokhov, E. V.; Kazakevich, M. I.; Turbin, S. V.; Nazim, Ya. V. Wind and ice impacts on overhead power transmission lines ; under the general editorship of E. V. Gorokhov. – Donetsk : [s. n.], 2005. – 348 p. – Text : direct. (in Russian)
10. Gorokhov, E. V.; Shapovalov, S. N.; Udod, E. I. Improving the reliability and durability of electric grid structures ; under the general editorship of E. V. Gorokhov. – Kiev : Technika, 1997. – 284 p. – ISBN 966-575-001-1. – Text : direct. (in Russian)
11. Gorokhov, E. V.; Bakayev, S. N.; Nazim, Ya. V. [et al.]. Failure cause and consequence analysis at the high voltage (330 kV) line sections of the dzhankoy local electrical power station of the Crimean electrical power system of the NEC «UKRENERGO». – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2010. – Volume 16, № 2. – P. 75–92. – URL: [https://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2010-2/01\\_gorohov\\_bakaev\\_nazim\\_morgaj\\_popov.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2010-2/01_gorohov_bakaev_nazim_morgaj_popov.pdf) (date of access: 16.10.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
12. GOST 27751-2014. Reliability of building structures and foundations : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 11, 2014 № 1974-st : introduced for the first time : introduction date 2015-07-01 / developed by Open Joint Stock Society «Scientific Research Center «Construction» (JSC «National Research Center «Construction»), Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko. – Moscow : Standartinform, 2015. – Text : direct. (in Russian)
13. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission line : International standard : This International Standard was approved by CEN on October 2021. – Geneva : Switzerland : [s. n.]. – 2002. – 186 p. – Text : direct. (in Russian)
14. SN-NS 3491-4. Design of structures : International standard : Design actions – Part 4: Wind loads : This International Standard was approved by CEN on May 2002. – Bochum (Germany) : [s. n.]. – 2000. – 7 p. – Text: direct.
15. ENV 1991-2-5:1997. Eurocode 1: Bases de calcul et actions sur les structures. Part 2-5: Actions on structures – thermal actions : This Irish Standard was published under the authority of the National Standards Authority of Ireland and comes into effect on : 30 June 1998. – Brussels : NSAI, 1997. – P. 7. – Text: direct.



- effect on : 30 June 1998. – Brussels : NSAI, 1997. – P. 7. – Текст : непосредственный.
16. Guidelines for Meteorological Icing Models, Statistical Methods and Topographical Effects // CIGRE, SC B2 WG 16 TF3. – 2005. – Draft, rev.6. – Paris, CIGRE. – Текст : непосредственный.
  17. Cigré WG B2.16. TB 291 Guidelines for meteorological icing models, statistical methods and topographical effects, Cigré, April 2006, Paris, France. – 116 p. – Текст : электронный. – URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/291-guidelines-for-meteorological-icing-models-statistical-methods-and-topographical-effects.html> (дата обращения: 16.10.2024).
  18. Overhead lines – Meteorological data for assessing climatic loads : IEC/TS 61774. – Geneva, Switzerland. – TR 2. Ed. 1. – 2000. – 91 p. – Текст : непосредственный.
  16. Guidelines for Meteorological Icing Models, Statistical Methods and Topographical Effects // CIGRE, SC B2 WG 16 TF3. – 2005. – Draft, rev.6. – Paris, CIGRE. – Text: direct.
  17. Cigré WG B2.16. TB 291 Guidelines for meteorological icing models, statistical methods and topographical effects, Cigré, April 2006, Paris, France. – 116 p. – Text: electronic. – URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/291-guidelines-for-meteorological-icing-models-statistical-methods-and-topographical-effects.html> (date of access: 16.10.2024).
  18. Overhead lines – Meteorological data for assessing climatic loads: IEC/TS 61774. – Geneva, Switzerland. – TR 2. Ed. 1. – 2000. – 91 p. – Text : direct.

#### Информация об авторах

**Горохов Евгений Васильевич** – доктор технических наук, профессор, президент Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений. Иностраный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

**Василев Владимир Николаевич** – кандидат технических наук, доцент; начальник лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередач, строительных конструкций и сооружений; технологий изготовления строительных конструкций.

**Миронов Андрей Николаевич** – кандидат технических наук; доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнutosварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций в том числе трубобетонных конструкций.

**Шевченко Анатолий Владимирович** – кандидат технических наук Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: стальные опоры линий электропередачи напряжением 6–1 500 кВ: разработка рабочих проектов; разработка новых конструктивных решений; изучение действительного состояния в процессе эксплуатации; разработка проектов усиления и реконструкции; исследование действительного напряженно-деформированного состояния в полевых и лабораторных условиях.

#### Information about the authors

**Gorokhov Yevgenii V.** – D. Sc. (Eng.), Professor; President of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. The Head of the Metal Structures and Constructions Department. Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Civil Engineering of Ukraine, Member of the International Committee of study of wind effects on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

**Vasylev Vladimir N.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Candidate of Technical Sciences; Head of the Laboratory for Testing Building Structures and Facilities Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: experimental and theoretical study of the operation of power transmission line supports, building structures and facilities; technologies for manufacturing building structures.

**Mironov Andrey N.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Structures and Structures Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, stress concentration in truss assemblies using wide-band I-beams and bent-welded closed profiles, stress-strain state of steel-reinforced concrete structures, including tube-concrete structures.

**Shevchenko Anatoly V.** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: steel poles of 6–1500 kV power transmission lines: development of work projects; development of new design solutions; study of the actual condition during operation; development of reinforcement and reconstruction projects; study of the actual stress-strain state in field and laboratory conditions.

*Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена после рецензирования 19.12.2024; принята к публикации 23.12.2024.*

*The article was submitted 02.12.2024; approved after reviewing 19.12.2024; accepted for publication 23.12.2024.*