

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.15

doi:10.52170/1815-9265_2026_80_93

Об эффекте снижения осадки при дискретизации фундамента

Владимир Евгеньевич Козловский¹, Иван Михайлович Смирнов²✉

^{1,2}Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

¹koslovskii@mail.ru

²sm.ivan00@gmail.com✉

Аннотация. При проектировании и эксплуатации опор воздушных линий электропередачи в сложных геологических условиях, таких как вечномёрзлые (многолетне-мерзлые) грунты, необходимо уделять особое внимание конструкции фундамента. Большинство фундаментов, устроенных в зонах распространения многолетне-мерзлых грунтов, выполнены на основе забивных типовых железобетонных свай. Данная конструкция характеризуется минимальными затратами на материалы, большой несущей способностью на горизонтальные нагрузки и на выдерживающую нагрузку, однако она наиболее подвержена действию сил морозного пучения. Для противодействия пучению разработано множество конструктивных и технологических мероприятий. Выполненный авторами анализ предложенных решений показал, что большинство мероприятий, реализованных в отечественной практике, требует проведения научно-исследовательских работ.

Целью настоящего исследования являлось обоснование применения поверхностных отдельных фундаментов, подтверждение эффективности, а также поиск наиболее рациональных конструктивных решений (конфигураций элементных фундаментов). Для анализа величин вертикальных деформаций и поведения элементных фундаментов различной конфигурации в целом были выбраны аналитические методы расчета, такие как метод послойного суммирования и метод линейно деформируемого слоя, а также численные методы, с применением специализированного геотехнического программного комплекса, реализующего метод конечных элементов.

Получены количественные данные по осадкам сплошного плитного и элементных фундаментов мелкого заложения, а также их влияния на массив грунта. Установлена эффективность применения элементных фундаментов в виде снижения вертикальных деформаций до 30–40 % по сравнению с типовым плитным вариантом сплошного сечения. Для каждой конфигурации фундамента представлены графические материалы включаемого в работу массива грунта.

Ключевые слова: элементные фундаменты, распределение напряжений, осадки, мерзлые грунты, метод послойного суммирования, метод линейно деформируемого слоя, метод конечных элементов

Для цитирования: Козловский В. Е., Смирнов И. М. Об эффекте снижения осадки при дискретизации фундамента // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 93–101. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_93.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

On the effect of reducing preparation during foundation discretisation

Vladimir E. Kozlovsky¹, Ivan M. Smirnov²✉

^{1,2}Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

¹koslovskii@mail.ru

²sm.ivan00@gmail.com✉

Abstract. When designing and operating overhead power line pylons in challenging geological conditions, such as permafrost (perennially frozen) soils, particular attention must be paid to the design of the foundations. Most foundations constructed in areas with permafrost are built using standard driven reinforced concrete piles. In frozen soils, this design is characterized by relatively low material costs and greater load-bearing capacity for horizontal loads and uplift loads, however, this type of structure is most susceptible to the effects of frost heave. A wide range of structural and technical measures has been developed to counteract heave. The authors' analysis of the proposed solutions has shown that most of the measures implemented in domestic practice require further research.

The aim of this study was to justify the use of shallow strip foundations, to confirm their effectiveness, and to identify the most rational structural solutions (configurations of foundation elements). The aim of this study was to

justify the use of shallow strip foundations, to confirm their effectiveness, and to identify the most appropriate structural solutions (configurations of foundation elements).

To analyse vertical deformations and overall behaviour. For strip foundations of various configurations, analytical calculation methods were selected, such as the layer-by-layer summation method and the linearly deformable layer method, as well as numerical methods, using a specialized geotechnical software package implementing the finite element method. Quantitative data were obtained on the settlements of continuous slab and element foundations, as well as their influence on the surrounding soil mass. The effectiveness of using element foundations was established in terms of a reduction in vertical deformations of up to 30–40% compared to a standard continuous slab foundation. Graphical materials illustrating the behaviour of the soil mass are presented for each foundation configuration.

Keywords: element foundations, stress distribution, settlements, element system, layer-by-layer summation method, linearly deformable layer method, finite element method

For citation: Kozlovsky V. E., Smirnov I. M. On the effect of reducing preparation during foundation discretisation. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):93–101. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_93.

Введение

Развитие регионов России тесно связано с ростом темпов энергетического строительства. Для достижения целей развития электроэнергетики, с учетом принятых сценарных условий и эффективного реагирования на вызовы будущего, на законодательном [1] и локальных [2] уровнях закреплены следующие направления развития:

- повышение эффективности строительного производства;
- применение инновационных технологий строительства;
- сокращение капитальных затрат и сроков строительства вследствие применения инновационных конструкций и материалов, индустриализации строительства;
- повышение качества строительства и реконструкции воздушных линий электропере-

дачи (ВЛ), надежности и долговечности законченных строительством объектов [2].

С освоением северных районов, в том числе зон с распространением многолетне-мерзлых грунтов (рис. 1), возрастает объем строительства и эксплуатации объектов в зонах со сложными геологическими условиями. Достаточно распространенной проблемой для свайных фундаментов в подобных условиях является воздействие сил морозного пучения (рис. 2).

Для уменьшения подъема фундаментов при пучении и возникновения перекоса в отечественной практике встречаются следующие решения:

- дополнительная забивка свай, объединяемая в совместную работу с несущей свайей, или усиление фундаментов крестовыми сваями;
- обваловка фундаментов опор на высоту, исключаящую оттаивание зоны сезонного промерзания;



Рис. 1. Схема распространения многолетне-мерзлых пород на территории России [2]

а)



б)



Рис. 2. Деформации фундаментов ВЛ:
а – выпучивание; б – перекос

– стабилизация температурного режима вечномёрзлых грунтов установкой сезонно охлаждающих устройств (СОУ);

– установка пригрузочных свай для увеличения веса фундаментов;

– перестановка стоек опор на элементные фундаменты – конструкции, состоящие из отдельных рассредоточенных элементов, объединенных в единую систему (рис. 3).

Применение элементных фундаментов, как указывалось в исследованиях [3, 4], является эффективным конструктивным мероприятием, в том числе и для борьбы с морозным пучением. Подобное решение было реализовано на участке Тарко-Сале – Уренгой на ВЛ 500 (220) кВ [5].

Исследованиями свойств составных фундаментов, используемых в качестве конструктивных решений, занимались такие отечественные ученые, как П. И. Романов [3, 5], И. В. Якименко [6], М. И. Фидаров [7], А. Н. Богомоллов, О. А. Богомоллова [8] и др.

Однако выполненный авторами анализ показал, что большинство реализованных предложенных аналогичных решений требует прове-

дения научно-исследовательских работ, с определением области эффективного применения.

Цель исследования – обоснование применения поверхностных отдельных фундаментов, подтверждение большей эффективности элементных фундаментов по сравнению со сплошной плитной конструкцией, а также поиск наиболее рациональных конструктивных решений из шести разработанных конфигураций системы фундамента.

В настоящем исследовании была выполнена группа расчетов с применением различных методов, получены количественные данные по осадкам плитных и элементных фундаментов, а также представлены характерные картины влияния фундаментов на массив грунта.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных для исследования был взят один из типовых фундаментов размером $1,50 \times 1,50$ м [9, 10]. Его площадь разбивается на несколько частей различной вариации с целью образования системы рассредоточенных элементов. В табл. 1 представлены геометрические характеристики шести собранных конфигураций элементного фундамента, которые

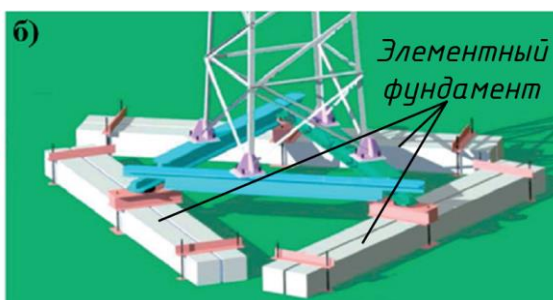
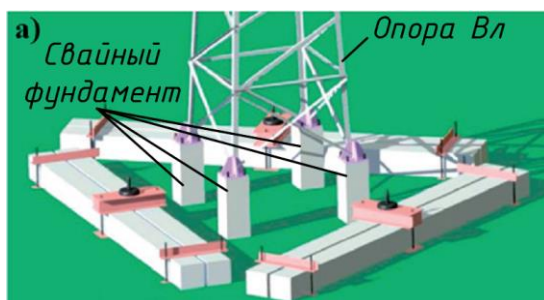


Рис. 3. Перестановка опор ПБ-1 на новые фундаменты без отключения ВЛ [5]:
а – опора на свайном фундаменте; б – опора на поверхностном элементном фундаменте

далее подверглись сравнению по одному из ключевых параметров при проектировании и эксплуатации фундаментов – величине осадки, реализующейся от нагрузки в 450 кН, приложенной к фундаменту в виде равномерно распределенной нагрузки.

Характеристики грунта, принятого в качестве основания, представлены в табл. 2.

На данный момент существует множество методов расчета осадки, с определенными допущениями и областями применения. Для получения более подробной картины деформации

Таблица 1

Основные конфигурации элементных фундаментов

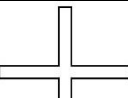
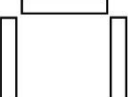
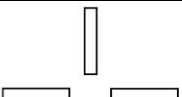
Тип	Схема	Описание	Площадь, м ²	Распр. нагрузка от 450 кН q, кПа
Цельный, квадратный		Опирается по площади 1,50 × 1,50 м	2,2500	200,00
Элементный, решетчатый		4 элемента 1,60 × 0,35 м, шаг в осях 1,00 м	2,2400	200,89
Элементный, двутавровый		3 элемента 2,00 × 0,35 м	2,1000	214,29
Элементный, крестовый, неразрывный		2 элемента 3,20 × 0,35 м	2,1175	212,51
Элементный, треугольный		3 элемента 2,00 × 0,35 м, пересечение осей 3,00 м	2,1000	214,29
Элементный, контурный		4 элемента 1,60 × 0,35 м, шаг в осях 2,00 м	2,2400	200,89
Элементный, крестовый, разрывный		4 элемента 1,60 × 0,35 м, центральный просвет 1,00 × 1,00 м	2,2400	200,89

Таблица 2

Нормативные и расчетные значения характеристик грунта

Номенклатурное наименование грунта	Характеристика	Коэфф. Пуассона ν	Число пластичности I _p	Плотность грунта ρ, г/см ³	Коэфф. пористости e	Показатель консолидации I _c	Показатели прочности		Модуль деформации E, МПа
							φ, град	c, кПа	
Глины пылеватые твердые зеленовато-серые дислоцированные	x _n	0,361	0,190	2,02	0,699	-0,06	14	67	18,5
	x ₁			2,01			14	65	
	x ₂			2,01			14	65	

Примечание. Характеристики грунта: x_n – нормативное значение; x₁ – для расчетов по несущей способности; x₂ – для расчетов по деформациям.

фундаментов различной конфигурации авторами статьи были выбраны несколько методов расчета – аналитические и численные.

В первом приближении использован инженерный метод послойного суммирования, основанный на задаче Лява – Короткина (рис. 4) для определения напряжений в точке:

$$\sigma_z = \frac{3qz^3}{2\pi} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{d\xi d\eta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]^{\frac{5}{2}}}, \quad (1)$$

где q – равномерно распределенное давление по подошве рассматриваемого фундамента; a и b – стороны фундамента; x, y, z – координаты произвольной точки.

Величина осадки в границах сжимаемой толщи определяется по формуле

$$S = \frac{\beta}{E} \int_0^{H_c} \sigma_z, \quad (2)$$

где β – безразмерный коэффициент, учитывающий жесткость фундамента.

Для дополнения результатов использован метод линейно деформируемого слоя, при котором осадка вычисляется как разность осадок кровли и подошвы слоя по формуле

$$S(z) = q \frac{1-\nu^2}{2\pi E} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} + \frac{1}{1-\nu} \frac{z^2}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} d\xi d\eta, \quad (3)$$

$$S = S(0) - S(H_c), \quad (4)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Для получения графической картины деформаций основания использован численный метод, с применением специализированного геотехнического программного комплекса Midas FEA NX, реализующего метод конечных элементов.

Решение задачи выполнялось в пространственной постановке с учетом стадийности работ (рис. 5):

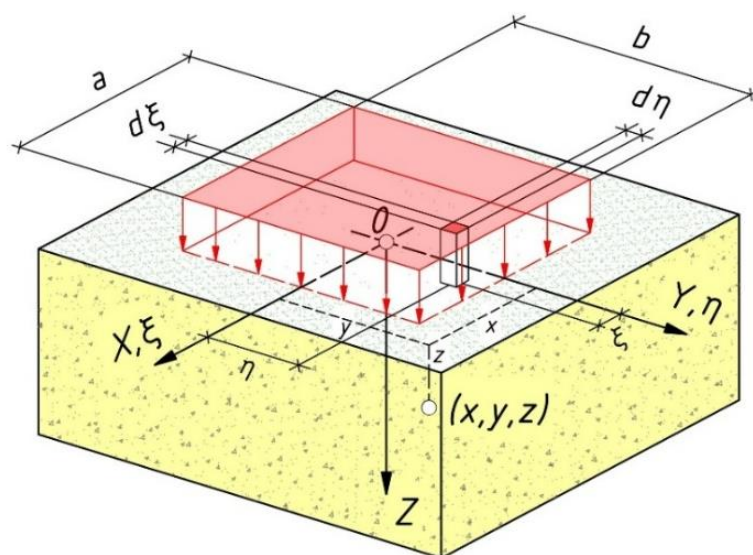
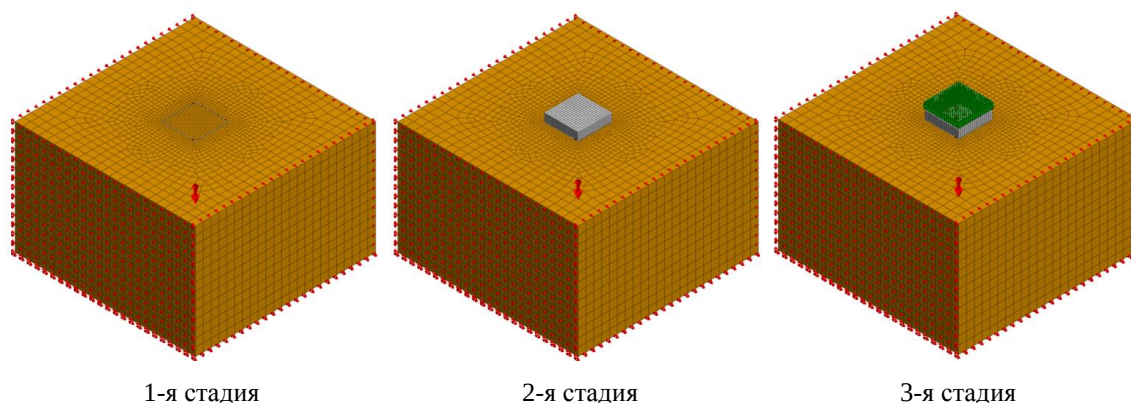


Рис. 4. Схема к определению напряжений в задаче Лява – Короткина



1-я стадия

2-я стадия

3-я стадия

Рис. 5. Учет стадийности работ при решении методом конечных элементов

1-я стадия – природное состояние (формирование НДС массива грунта);

2-я стадия – строительство (устройство фундамента);

3-я стадия – эксплуатация (загружение фундамента).

Результаты исследования

В качестве базовой величины, на основе которой вычисляется доля в процентах (табл. 3), принята вертикальная деформация сплошного плитного фундамента (конфигурация 1).

На рис. 6 представлены изополя вертикальных деформаций, полученные в результате численных вычислений. Цветовое ранжи-

рование выполнено на базе первого фундамента с максимальной осадкой в 10,07 мм.

Для более наглядной интерпретации результатов на рис. 7 приведена диаграмма соотношения результатов осадки по каждой конфигурации фундамента.

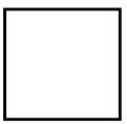
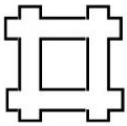
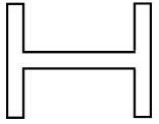
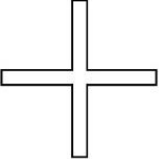
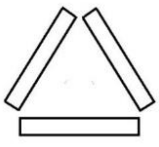
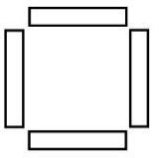
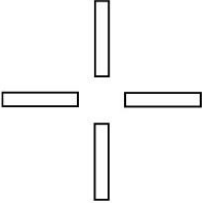
Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Доказана эффективность дискретизации сплошного фундамента (конфигурация 1). За счет перехода на систему рассредоточенных элементов для конфигурации 2 отмечено сокращение расхода материалов до 30 %, а для конфигураций 3–7

Таблица 3

Сводная таблица результатов аналитического и численного расчетов

№	Конфигурация элементного фундамента	Метод послойного суммирования		Метод линейно дефор- мируемого слоя		Метод конечных элементов	
		Осадка, мм	Процент осадки	Осадка, мм	Процент осадки	Осадка, мм	Процент осадки
1		11,77	100,00	12,12	100,00	10,07	100,00
2		11,04	93,80	10,93	90,18	9,94	98,71
3		9,28	78,85	9,46	78,06	7,42	73,68
4		8,08	68,65	8,14	66,67	7,63	75,77
5		7,43	63,13	7,47	61,63	7,38	73,29
6		6,62	56,25	6,62	54,62	7,12	70,71
7		5,65	48,01	5,66	46,70	6,78	67,33

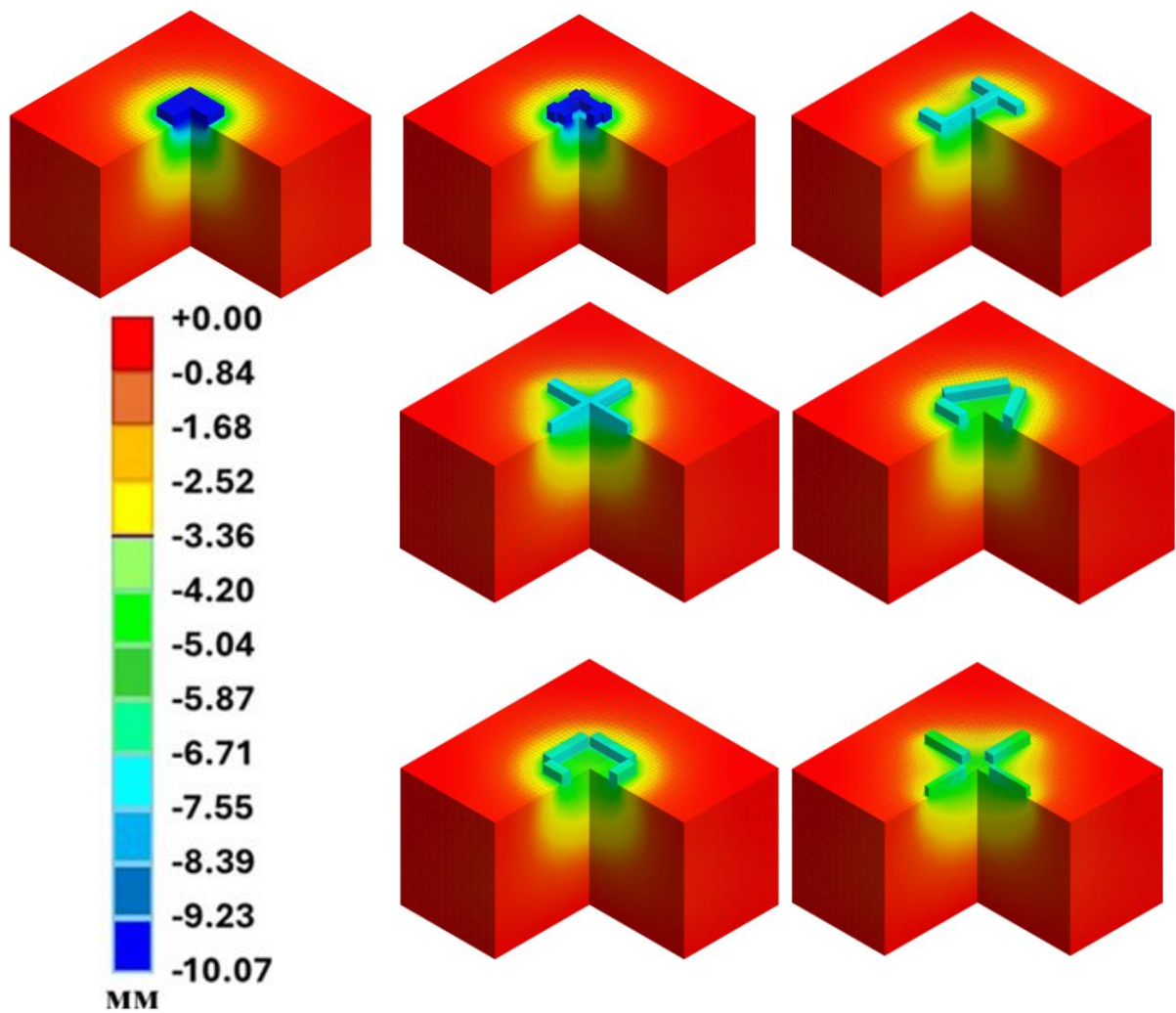


Рис. 6. Изополя вертикальных деформаций грунтового массива для конфигураций 1–7 с вертикальным разрезом четверти модели

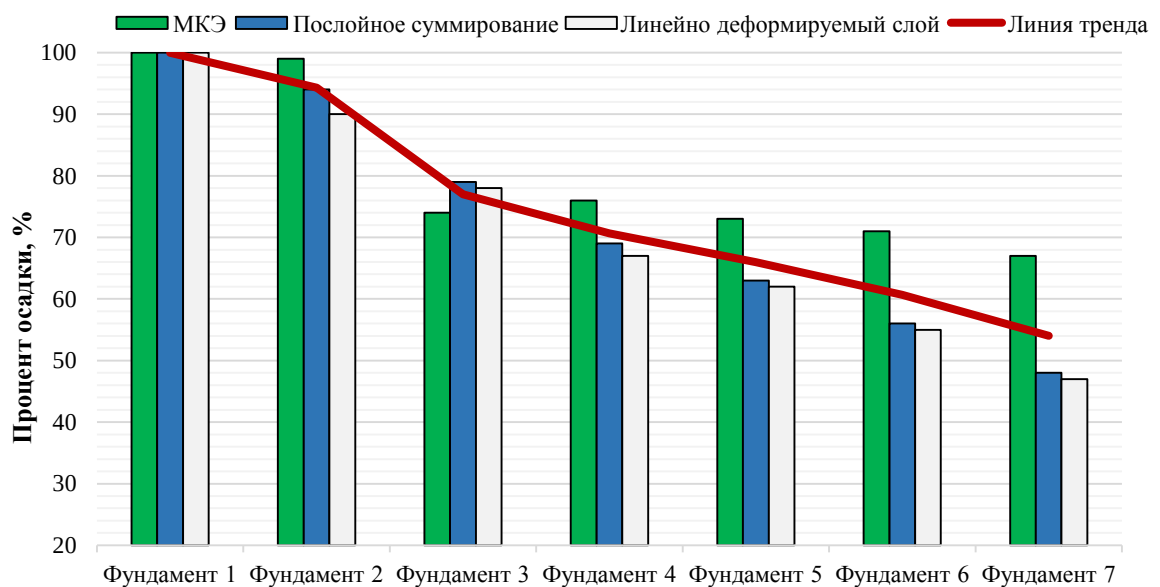


Рис. 7. Диаграмма снижения вертикальных деформаций

(при схожем расходе железобетона) – снижение величины вертикальных деформаций до 30–40 %.

2. Подобное решение может быть реализовано в строительной практике в качестве мероприятий, направленных на борьбу с морозным пучением.

3. Анализ результатов численных расчетов доказывает и гипотезу о повышении несущей способности фундамента за счет увеличения

объема включаемого в работу массива грунта (более эффективного распределения напряжений в грунте).

4. Конструктивные мероприятия в виде дискретизации фундамента подлежат дальнейшему научному анализу с целью более точного определения области эффективного применения и более подробного анализа свойств элементных фундаментов.

Список источников

1. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р. // Официальное опубликование правовых актов : [сайт]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (дата обращения: 21.02.2026).

2. Обзор практически реализованных фундаментов опор ВЛ 220 кВ и выше для мерзлых грунтов / ФСК ЕЭС РОССЕТИ // Научно-исследовательская лаборатория конструкций электросетевого строительства : [сайт]. URL: <https://нилкэс.пф/wp-content/uploads/2022/10A1.pdf> (дата обращения: 21.02.2026).

3. Романов П. И., Козловский В. Е. Концепция нового поколения фундаментов опор ВЛ // Фундаменты. 2024. № 2 (16). С. 48–51.

4. Козловский В. Е., Смирнов И. М. Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 2. С. 489–497.

5. Романов П. И. Перестановка опор ВЛ на поверхностные фундаменты – решение проблем с пучением свайных оснований // Опоры и фундаменты для умных сетей: инновации в проектировании и строительстве : сборник докладов. Санкт-Петербург, 2018. С. 8–13.

6. Якименко И. В. К вопросу о несущей способности составных ленточных фундаментов // Вестник Евразийской науки. 2018. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN218.pdf> (дата обращения: 21.02.2026).

7. Фидаров М. И. Проектирование и возведение прерывистых фундаментов. Москва : Стройиздат, 1986. 157 с.

8. Богомоллов А. Н., Якименко И. В., Богомоллова О. А. Повышение несущей способности основания как следствие использования составных ленточных фундаментов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. Вып. 19 (38). С. 5–11.

9. Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.407-115. Фундаменты под унифицированные металлические опоры ВЛ 35-330 кВ // МЕГАНОРМ : система нормативных документов : [сайт]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293833/4293833466.htm> (дата обращения: 21.02.2026).

10. Типовые конструкции и детали зданий и сооружений. Серия 3.407.1-144. Унифицированные конструкции фундаментов для стальных опор ВЛ 35-500 кВ // МЕГАНОРМ : система нормативных документов : [сайт]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293845/4293845236.htm> (дата обращения: 21.02.2026).

References

1. Order of the Government of the Russian Federation of April 12, 2025 No. 908-r. 'On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2050'. (In Russ.). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013>.

2. Review of practically implemented foundations for 220 kV and higher overhead line supports in frozen soils. *FGC UES ROSSETI. Research Laboratory of Electrical Grid Construction Designs*. (In Russ.). URL: <https://нилкэс.пф/wp-content/uploads/2022/10A1.pdf>.

3. Romanov P. I., Kozlovsky V. E. Concept of a new generation of overhead line support foundations. *Foundations*. 2024;(16):48–51. (In Russ.).

4. Kozlovsky V. E., Smirnov I. M. On elemental foundations for high-voltage line supports. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024;21(2):489–497. (In Russ.).

5. Romanov P. I. Relocation of overhead line supports to surface foundations: solving the problem of heaving pile foundations. *Proceedings. Supports and Foundations for Smart Grids: Innovations in Design and Construction*. St. Petersburg; 2018. P. 8–13. (In Russ.).

6. Yakimenko I. V. On the bearing capacity of precast strip foundations. *Bulletin of Eurasian Science*. 2018. No. 2. (In Russ.). URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN218.pdf>.
7. Fidarov M. I. Design and construction of intermittent foundations. Moscow: Stroyizdat; 1986. 157 p. (In Russ.).
8. Bogomolov A. N., Yakimenko I. V., Bogomolova O. A. Increasing the bearing capacity of the foundation as a result of using precast strip foundations. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2010;19(38):5–11. (In Russ.).
9. Standard Foundations for Unified Metal Supports for 35-330 kV Overhead Lines, Series 3.407-115. *MEGANORM: system of regulatory documents: [site]*. (In Russ.). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293833/4293833466.htm>.
10. Standard Foundation Designs for Steel Supports for 35-500 kV Overhead Lines, Series 3.407.1-144. *MEGANORM: system of regulatory documents: [site]*. (In Russ.). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293845/4293845236.htm>.

Информация об авторах

В. Е. Козловский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

И. М. Смирнов – аспирант кафедры «Основания и фундаменты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

Information about the authors

V. E. Kozlovsky – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Bases and Foundations Department, Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University.

I. M. Smirnov – Postgraduate Student of the Bases and Foundations Department, Emperor Alexander I Saint-Petersburg State Transport University.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 14.04.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 18.06.2026.