

УДК: 624.159.2

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.2

EDN: BWDEWS



Метод сплайн-интерполяции для анализа осадки оснований зданий

Н.С. Никифорова¹, Д.Д. Пирогов¹, Д.Е. Разводовский²

¹Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений имени Н. М. Герсевича
АО «НИИ Строительство», Москва, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В практике реконструкции зданий с устройством подземной части контроль деформаций оснований имеет критическое значение. Традиционные критерии, основанные только на значениях осадки и относительной её неравномерности, не всегда позволяют точно оценить риски.

Цель работы – разработка и проверка метода количественной оценки деформаций оснований с применением дополнительных параметров: кривизны и разности углов наклона подошвы фундамента.

Задачами исследования являются:

1. Анализ предельных величин осадок деформаций для реконструируемых зданий по различным нормативным документам;
2. Разработка алгоритмов расчёта производных осадки на основе кубической сплайновой интерполяции для существующего объекта реконструкции с анализом пространственного распределения деформаций.
3. Сопоставление полученных деформаций оснований с нормативными значениями и наблюдениями за возникновением дефектов конструкций

Результаты. Предложенный метод реализован для анализа осадок здания Средних Торговых рядов в Москве. Полученные эпюры осадки, углов наклона и кривизны подошвы фундаментов позволяют выявить зоны максимальных деформаций оснований между геодезическими марками, не идентифицируемые традиционными методами.

Выводы. Применение критериев деформаций – кривизны и разности углов наклона подошвы фундамента позволяет существенно повысить точность оценки состояния основания реконструируемого здания. Методика может быть интегрирована в систему геотехнического мониторинга при реконструкции в условиях плотной городской застройки.

Ключевые слова: осадка, реконструкция, кривизна, разность углов наклона подошвы фундаментов, сплайновая интерполяция, глубокий котлован, геотехнический мониторинг.

Для цитирования: Никифорова Н.С., Пирогов Д.Д., Разводовский Д.Е. Метод сплайн-интерполяции для анализа осадки оснований зданий // Известия КГАСУ, 2025, № 3 (73), с. 20-29, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.2, EDN: BWDEWS

Spline interpolation method for analyzing building foundation settlement

N.S. Nikiforova¹, D.D. Pirogov¹, D.E. Razvodovsky²

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
Scientific Research, Design, Surveying and Technological Institute of Foundations and Underground Structures named after N. M. Gersevanov JSC "Scientific Research Center Construction", Moscow, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* In the practice of building reconstruction involving underground construction, controlling foundation deformations is of critical importance. Traditional criteria based solely on settlement values and their relative unevenness are often insufficient for accurate risk assessment.

The objective of the work is to develop and validate a method for the quantitative assessment of foundation deformations using additional parameters, such as curvature and the difference in tilt angles at the base of the foundation.

The research tasks are:

1. To analyze the permissible deformation limits for reconstructed buildings according to various regulatory documents;
2. To develop algorithms for calculating the derivatives of settlement using cubic spline interpolation for an existing reconstruction project, and to analyze the spatial distribution of deformations;
3. To compare the calculated foundation deformations with regulatory limits and with recorded instances of structural defects.

Results. The proposed method was implemented in the settlement analysis of the Middle Trading Rows building in Moscow. The resulting diagrams of settlement, inclination angles, and curvature of the foundation base made it possible to identify zones of maximum ground deformation between geodetic benchmarks that were previously unrecognizable using traditional methods.

Conclusions. The use of curvature and differential tilt angle as additional evaluation criteria significantly improves the accuracy of assessing foundation conditions in reconstructed buildings. The method can be integrated into geotechnical monitoring systems for urban reconstruction projects.

Keywords: settlement, reconstruction, curvature, differential tilt angle of the foundation base, spline interpolation, deep excavation, geotechnical monitoring.

For citation: Nikiforova N.S., Pirogov D.D., Razvodovsky D.E. Spline Interpolation Method for Analyzing Building Foundation Settlement // News of KSUAE, 2025, № 3 (73), p. 20-29, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.2, EDN: BWDEWS

1. Введение

Контроль деформаций оснований является важнейшей задачей при реконструкции зданий с устройством подземной части. В таких условиях существенно возрастают риски перераспределения напряжений, дополнительных осадок и деформаций оснований фундаментов, особенно в зоне влияния глубоких котлованов и ограниченного доступа к конструкциям.

Дополнительные величины деформаций оснований реконструируемых зданий регламентированы рядом нормативных документов, включая СП 22.13330.2016 "Основания зданий и сооружений" (таблицы Е1 и К1 приложений Е и К), Справочник геотехника под редакцией В.А. Ильичева и Р.М. Мангушева (2023 г., табл. 13.19 — для реконструируемых зданий с устройством глубоких котлованов, а также табл. 15.3 — для сохраняемых конструкций на основаниях, сложенных слабо литифицированными глинистыми грунтами и рыхлыми песками), ТСН 50-302-2004 "Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге" (табл. 4.1), а также ГОСТ 56198–2014 "Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые

памятники. Общие требования" (табл. Ж1 Приложения Ж — для объектов культурного наследия в зоне влияния реставрационных работ).

В случае реконструкции зданий с устройством подземной части возникает необходимость определить, каким нормативным документом и какой таблицей дополнительных предельных деформаций следует руководствоваться при оценке состояния оснований.

В качестве критериев дополнительных деформаций оснований вышеуказанные документы предлагают максимальную осадку, относительную разность осадок и крен. В частности, таблица 13.19 из Справочника геотехника и таблица Ж1 из ГОСТ 56198–2014 дополнительно вводят такой параметр, как кривизна подошвы фундамента. Кроме того, разность углов наклона подошвы фундамента также рассматривается как критерий дополнительных деформаций в таблице 13.19, что согласуется с пунктом Л3 Приложения Л СП 22.13330.2016 (с изменениями 1–5), в котором указывается, что «при геотехническом мониторинге сооружений окружающей застройки... допускается проводить фиксацию иных контролируемых параметров... в т.ч. дополнительную разность углов наклона подошвы фундамента и др...».

Вопросу развития осадок зданий при реконструкции с освоением подземного пространства посвящены публикации [1-3]. В этих работах рассматриваются механизмы деформирования оснований зданий, находящихся в зоне влияния строительных работ, включая воздействие глубоких котлованов, защитных мероприятий и надстроек [4]. Авторы обосновывают необходимость применения уточнённых методов прогнозирования осадки и внедрения дополнительных критериев оценки, включая кривизну и углы наклона подошвы фундаментов, особенно в условиях плотной городской застройки и реконструкции объектов культурного наследия.

В работе [5], представленной на международном симпозиуме Heritage for Planet Earth, предложен комплексный подход к прогнозированию осадки оснований исторических зданий с учётом специфики плотной городской застройки. Исследование основывается на обширном анализе зарубежного и отечественного опыта, численном моделировании в программных комплексах PLAXIS и MIDAS GTS, а также на натурных наблюдениях за деформациями зданий в Москве. Авторами была разработана методика, позволяющая оценивать ожидаемую осадку реконструируемого здания в условиях устройства подземной части. Ключевая особенность подхода заключается в учёте комплекса коэффициентов: снижение осадки за счёт защитных мероприятий (например, инъекционного закрепления или применения распорных систем), учёт повышения прочностных характеристик грунта за длительный период эксплуатации здания, а также увеличение осадки при надстройке одного этажа. Приведены количественные диапазоны этих коэффициентов, полученные на основе экспериментальных и модельных данных: например, коэффициент снижения $K_{\text{сг}}$ варьируется от 0,02 до 0,7 в зависимости от типа применённых защитных технологий. В качестве дополнительного критерия оценки деформаций предложено использовать предельную кривизну подошвы фундамента, значение которой для зданий с несущими кирпичными стенами без армирования определено как $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. Предложенная методика может быть использована на стадии предпроектных проработок и при инженерном обосновании геотехнических решений, особенно в случае зданий, относящихся к объектам культурного наследия.

Технологическая составляющая осадок, в том числе при реконструкции зданий, рассмотрены в статьях [6, 7]. В этих статьях предложены формулы для расчёта технологической составляющей осадки, учитывающие влияние различных видов защитных мероприятий и типов ограждений котлованов. Среди рассматриваемых мероприятий: буроинъекционные и компенсационные сваи усиления, грунтоцементные сваи, вдавливаемые сваи, шпунтовые ограждения, распорные конструкции (в том числе с домкратами), а также барьерное инъекционное закрепление грунта в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При реконструкции зданий с освоением подземного пространства широкое распространение получило применение технологии струйной цементации для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Проблемы устройства грунтоцементных элементов и определения величины технологической составляющей осадки таких зданий подробно раскрыты в работах [8-10].

Развитие осадок по внутреннему и внешнему контурам реконструируемого здания Средних торговых рядов в центре Москвы по данным мониторинга представлено в статье [11]. Использование дополнительных критериев для оценки деформаций оснований зданий в зоне влияния глубоких котлованов подтверждено в работах [12, 13]. Анализируя деформации оснований исторических, в том числе реконструируемых зданий, В.А. Шашкин [14] косвенно указывает на необходимость расширения системы оценки, подчёркивая, что «...“живучесть” исторических зданий оказывается, как минимум на порядок выше нормативных критериев по относительной неравномерности осадок».

Критерий определения допустимых деформаций зданий, связанный с разностью углов наклона подошвы фундамента, пока используется лишь в ограниченном количестве случаев. Основным препятствием к его применению можно считать отсутствие нормативных методик, регламентирующих использование метода. В рамках настоящей статьи показана возможность применения метода при ограниченном наборе данных мониторинга, что особенно актуально для исторических зданий.

Несмотря на наличие формул для вычисления кривизны и разности углов наклона подошвы фундамента, их применение ограничено, а методическая база анализа дополнительных производных деформаций, которые примерно равны вышеупомянутым критериям деформаций, остаётся фрагментарной. В данной работе предлагается новый метод, основанный на сплайн-интерполяции осадки с последующим расчётом её производных – угла наклона и кривизны, позволяющий восстанавливать непрерывное распределение осадки и выявлять деформации между точками измерений.

Цель работы – разработка и проверка метода количественной оценки деформаций оснований с применением дополнительных параметров: кривизны и разности углов наклона подошвы фундамента.

Задачами исследования являются:

1. Анализ предельных величин осадок деформаций для реконструируемых зданий по различным нормативным документам;
2. Разработка алгоритмов расчёта производных осадки на основе кубической сплайновой интерполяции для существующего объекта реконструкции с анализом пространственного распределения деформаций.
3. Сопоставление полученных деформаций оснований с нормативными значениями и наблюдениями за возникновением дефектов конструкций.

2. Материалы и методы

Для количественной оценки деформаций оснований в работе использован метод построения непрерывного профиля осадки с помощью кубической сплайн-интерполяции, позволяющей восстанавливать функцию осадки и её производные (угол наклона и кривизну) между точками измерений. Методика ориентирована на анализ зданий, для которых данные об осадках доступны в виде дискретных значений, полученных в результате геодезических наблюдений.

В качестве ключевых производных параметров использованы: – первая производная функции осадки $S'(x)$ – угол наклона подошвы фундамента, – вторая производная $S''(x)$ – кривизна подошвы фундамента.

При равномерных расстояниях между марками использовалась стандартная конечно-разностная аппроксимация второй производной (формула В.А. Ильичева [12]):

$$S''(x) \approx \frac{S(x + 2\Delta x) - 2S(x + \Delta x) + S(x)}{\Delta x^2} \quad (1)$$

где Δx – расстояние между точками измерения осадки, м.

При неравномерных расстояниях ($\Delta x_1 \neq \Delta x_2$) применялась модифицированная формула, выведенная из разложения функции осадки в ряд Тейлора:

$$S''(x) \approx \frac{(S_1(x_2) - S_2(x_1 + x_2) + S_3(x_1))}{x_1(x_1 + x_2)x_2} \quad (2)$$

где:

x_1 – расстояние между точками измерения осадки S_1 и S_2 , м;

x_2 – расстояние между точками измерения осадки S_2 и S_3 , м.

Для построения непрерывной кривой осадки применена интерполяция кубическими сплайнами, обеспечивающая непрерывность функции и её производных первого и второго порядка. Кубический полином использован как наиболее гибкий инструмент для описания плавных изменений осадки и её изгибов при приемлемой вычислительной сложности.

Преимущество метода заключается в способности оценивать величины деформаций в зонах между геодезическими марками, что критически важно для реконструируемых объектов, где расстояния между измерительными точками неравномерны, а плотность наблюдений ограничена.

Метод реализован в среде Python с использованием библиотек NumPy и SciPy и может быть адаптирован для автоматизированной обработки данных геотехнического мониторинга. Результаты представлены в виде эпюр осадки, угла наклона и кривизны подошвы фундаментов вдоль изучаемого контура.

3. Результаты и обсуждение

Протяженные в плане объекты являются хорошей иллюстрацией для того, чтобы показать возможности предлагаемого метода. Одним из таких объектов является здание Средних Торговых рядов в Москве, с документированными данными по мониторингу [16, 17], включая осадки от нового строительства, реконструкции и технологические осадки. Объект представляет собой комплекс с замкнутым контуром (корпус А), внутри которого был построен корпус Б с четырьмя подземными и пятью надземными этажами. Котлован был ограждён стеной в грунте, а существующие фундаменты усилены грунтоцементными элементами. На рис. 1 приведены эпюры замеренных осадок после завершения строительных работ.

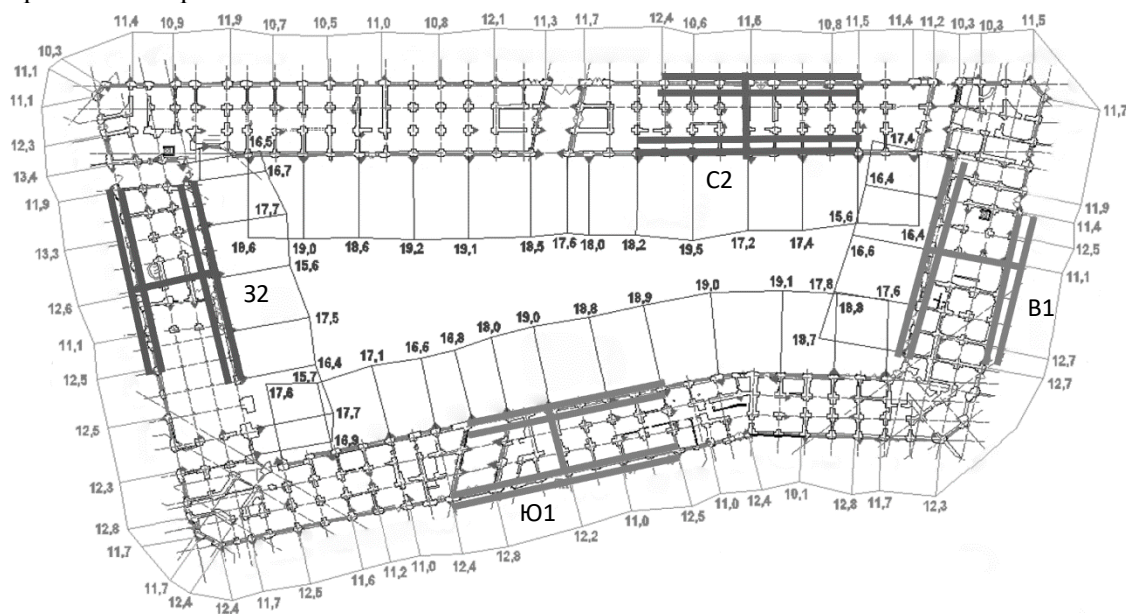


Рис. 1. Эпюры осадок внутреннего и внешнего контуров здания Средних торговых рядов [16,17]. C2, B1, Ю1, 32 – расчетные зоны для определения деформаций по поперечным стенам с северной, восточной, южной и западной сторон (иллюстрация авторов).

Fig. 1. Settlement diagrams of the inner and outer contours of the Middle Trading Rows building [16,17]. C2, B1, Ю1, 32 – calculation zones for determining deformations along the transverse walls on the northern, eastern, southern, and western sides (illustration by the authors).

На основе предложенной методики построены графики распределения осадки, кривизны и разности углов наклона подошвы фундаментов для всего здания, а на рис.2 – вдоль внутренней стены корпуса А с южной стороны.

Максимальная осадка по длине стены достигала 1,8 см, что превышает дополнительное предельное значение 1 см согласно табл. К1 Приложения К СП 22.13330 для реконструируемого здания-памятника с категорией 3 технического состояния конструкций. При этом дополнительные величины: относительная разность осадок, а также кривизна остались в пределах допустимых значений ($\pm 7E-4$ и $\pm 2E-5$ 1/м соответственно).

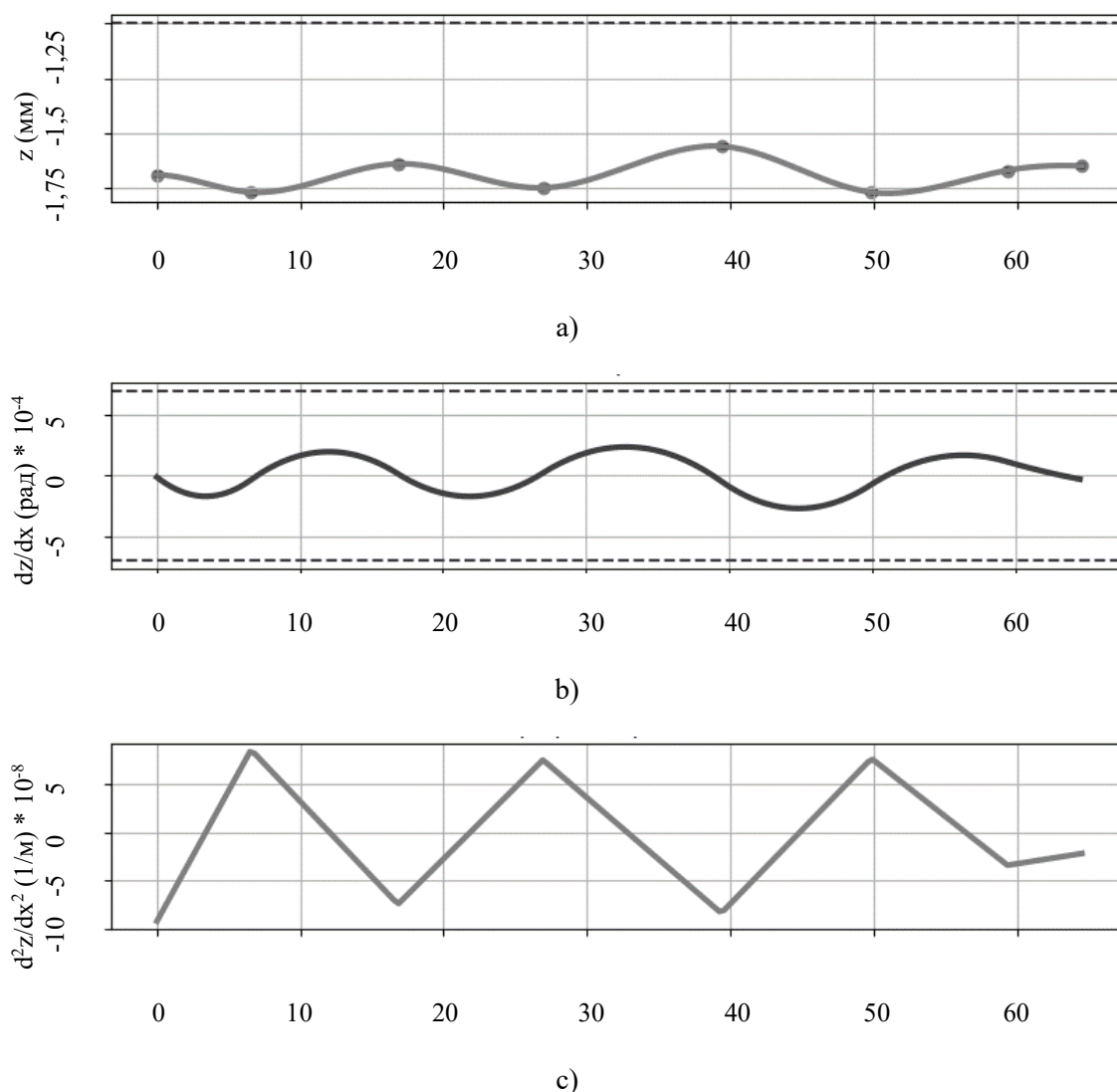


Рис.2 Графики развития деформаций вдоль внутренней стены корпуса А (в направлении с запада на восток): а) Профиль осадки с граничным условием -10 мм; б) Относительная разность осадок с граничным условием $\pm 7E-4$; в) Профиль кривизны с граничным условием $\pm 2E-5$ 1/м (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Deformation development graphs along the inner wall of Building A (from west to east): a) Settlement profile with a boundary condition of -10 mm; b) Relative differential settlement with a boundary condition of $\pm 7E-4$; c) Curvature profile with a boundary condition of $\pm 2E-5$ 1/m (illustration by the authors)

Согласно данным геотехнического мониторинга, проводимого НИИОСП им. Н.М. Герсевича, в стене здания дополнительные дефекты не возникли, что подтверждает возможность использовать для оценки деформаций дополнительные критерии и не применять дополнительных защитных мероприятий.

Для анализа поперечных сечений использована двухсторонняя сплайновая интерполяция осадки: отдельно для внутренней и внешней стороны фундаментов. На основе этих данных построены графики деформаций оснований поперечных стен, представленные на рис. 3. Расположение расчетных зон см. на рис. 1.

Графики деформаций оснований поперечных стен позволяют локализовать зоны с наиболее выраженными деформациями, в том числе между геодезическими марками. Методика наглядно показывает возможный характер распределения деформаций в участках с ограниченным числом измерений и может использоваться для инженерной оценки оснований при реконструкции или при оценке технического состояния в зоне влияния нового строительства на участках, где не зафиксировано наличие крупных дефектов в виде трещин или локальных разрушений.

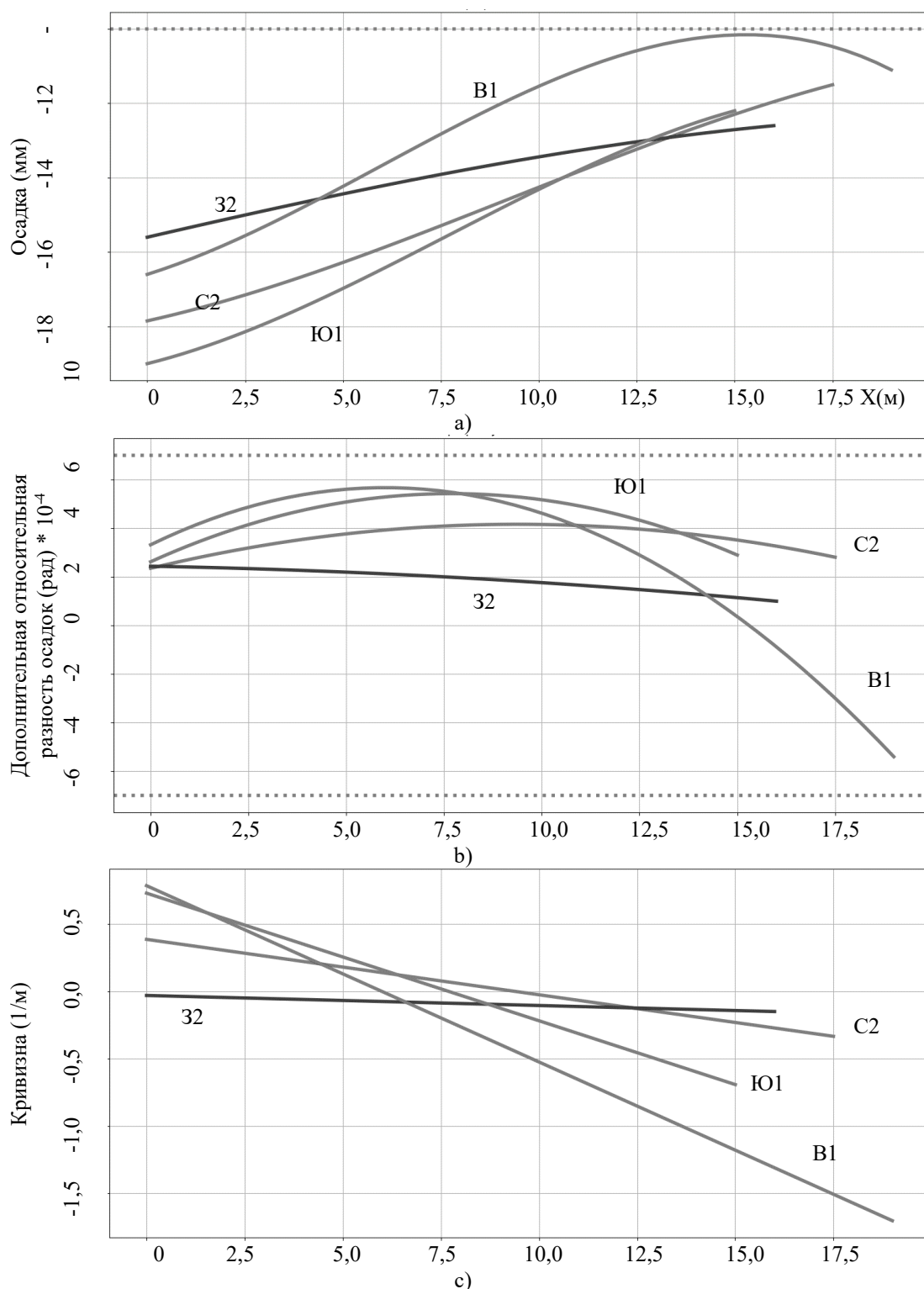


Рис.3 Графики развития деформаций поперечных стен здания Средних торговых рядов: а) График осадки с граничным условием -10 мм; б) Дополнительная относительная разность осадок с граничным условием $\pm 7E-4$; в) Кривизна с граничным условием $\pm 2E-5$ 1/м; х-удаленность точек на поперечных стенах корпуса А в направлении от внутренней к наружной стене (иллюстрация авторов).

Fig. 3. Deformation development graphs for the transverse walls of the Middle Trading Rows building: а) Settlement graph with a boundary condition of -10 mm; б) Additional relative differential settlement with a boundary condition of $\pm 7E-4$; в) Curvature with a boundary condition of $\pm 2E-5$ 1/m; x-axis represents the distance of points on the transverse walls of Building A from the inner to the outer wall (illustration by the authors)

Полученные графики кривизны и углов наклона позволяют формировать

непрерывное представление о характере деформаций по длине стен, в том числе между геодезическими марками. В отличие от подходов, регламентированных действующими нормами (например, СП 22.13330), где анализ осадок и их относительной неравномерности осуществляется дискретно и ограничивается оценкой единичных значений, рассчитанных по данным измерений соседних марок, предлагаемая методика позволяет получить сглаженные кривые на основе сплайн-интерполяции. При этом угол наклона подошвы фундамента отображается как функция вдоль всей расчетной длины, а не в виде усреднённого значения на участке между двумя марками, как это принято в традиционном подходе. Кривизна подошвы фундамента, как правило, не рассматривается в нормах, за исключением ГОСТ 56198–2014, тогда как в рамках данной методики она может быть использована как чувствительный критерий локальных деформаций. Методика даёт возможность более точно оценивать распределение деформаций и выявлять потенциально опасные зоны, недоступные для интерпретации при использовании нормативных методов.

Методика может быть использована также для прогноза деформаций с учетом технологической составляющей оснований реконструируемых с устройством подземной части зданий. В отличие от существующих подходов, она даёт возможность перехода от дискретных наблюдений к количественным оценкам пространственной формы деформаций, что расширяет возможности инженерного анализа при реконструкции.

4. Заключение

Нормативные документы содержат существенно отличающиеся по величине значения дополнительных предельных деформаций оснований реконструируемых зданий и зданий в зоне влияния глубоких котлованов. Поэтому, предельные значения дополнительных деформаций зданий, реконструируемых с устройством подземной части, требуют уточнения и введения дополнительных критериев – угла наклона и кривизны подошвы фундамента.

Метод анализа деформаций оснований зданий, основанный на кубической сплайн-интерполяции, позволяет спрогнозировать непрерывный профиль осадки, в том числе, для недоступных участков и вычислять угол наклона и кривизну подошвы фундамента. Это даёт возможность локализовать участки с максимальными деформациями, в том числе в межмарочных промежутках, где традиционные методы дают противоречивые результаты. На примере исторического здания в центре Москвы продемонстрирована суть метода, а также его эффективность в условиях ограниченного доступа к измерениям. Полученные результаты могут быть использованы для внедрения подходов ГОСТ 56198-2014 или при разработке новых методов оценки состояния реконструируемых зданий.

Отсутствие дополнительных дефектов в стене здания, подтвержденное данными наблюдений, доказывает возможность применения метода сплайн-интерполяции для построения непрерывных графиков деформаций оснований и дополнительных критериев их оценки.

Список источников/ References

1. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Kharchenko I.Y., Dmitriev V.V. Scientific-Technical Supervision During Reconstruction of the Lenin Mausoleum on Red Square in an Area of Soil-Bed Stabilization // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. Vol. 52, No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1007/s11204-015-9297-9
2. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Predicting Deformations of the Surrounding Buildings Foundations with Regard to Protective Measures // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021. Vol. 57, Issue 6. P. 445–451. DOI: 10.1007/s11204-021-09691-6
3. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S. Bases and Foundations of Moscow Citadels: Reconstruction and New Construction // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024. Vol. 60, No. 6. P. 542–547. DOI: 10.1007/s11204-024-09927-1
4. Mirsayapov Ilizar T., Aysin N. N. Subgrade vertical deformations of a building in the zone of a deep pit influence // *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. Kazan. Vol. 890. 2020. P. 012071. DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012071. EDN HMQXVS.
5. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Modern Geotechnologies for Historical

- Buildings Regarding Underground Space Renovation // Proceedings of the International Symposium Heritage for Planet Earth 2018. 20th General Assembly of the International Experts, March 3–4, 2018. P. 291–295.
6. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Technological Settlement Due to Protection of the Existing Buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. No. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012026
 7. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological Settlements of the Surrounding Buildings During the Construction of Deep Pit Fences // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Published 21 April 2023. DOI: 10.1007/s11204-023-09858-3
 8. Никифорова Н.С., Григорян Т.Г. Опыт применения грунтоцементных свай при реконструкции с освоением подземного пространства. СПб, Сборник статей международной научно-технической конференции «Численные методы расчетов в практической геотехнике», 2012. С 326–331.
Nikiforova N.S., Grigoryan T.G. Experience in the Application of Soil-Cement Piles in the Reconstruction Involving Underground Space Development. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Numerical Methods in Practical Geotechnics”, St. Petersburg, 2012. P. 326–331.
 9. Разводовский, Д. Е. Оценка влияния усиления фундаментов зданий по технологии струйной цементации на их осадку/ Д. Е. Разводовский, А. А. Чепурнова // Промышленное и гражданское строительство. М., 2016, №10. с. 64–72.
Razvodovsky D.E., Chepurnova A.A. Assessment of the Influence of Jet-Grouting Foundation Strengthening on Building Settlements // Industrial and Civil Engineering. Moscow, 2016. No. 10. P. 64–72.
 10. Chepurnova A.A. Assessing the influence of jet-grouting underpinning on the nearby buildings // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. No. 2. P.105–112.
 11. Разводовский Д.Е., Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А. Применение jet-grouting для усиления фундаментов и грунта основания. Ретроспектива. Применение jet-grouting для усиления фундаментов и грунта основания. Ретроспектива // Усиление оснований и фундаментов: Труды VIII Петрухинских чтений / Под ред. канд. техн. наук И.В. Колыбина и д-ра техн. наук О.А. Шулятева. Москва: Изд-во АО «НИЦ «Строительство». 2024. С. 124–144. <https://doi.org/10.37538/2713-1149-2024-124-144>
Razvodovsky D.E., Zekhniev F.F., Vnukov D.A. Application of Jet-Grouting for Strengthening Foundations and Subsoil: A Retrospective View. Foundation and Subsoil Reinforcement: Proceedings of the 8th Petrukhin Conference, ed. by I.V. Kolybin, Cand. Sci. (Tech.), and O.A. Shulyatev, Dr. Sci. (Tech.). Moscow: Research Center “Construction”. 2024. P. 124–144. DOI: <https://doi.org/10.37538/2713-1149-2024-124-144>
 12. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Новые методы измерения деформаций зданий и критерии их оценки// Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. № 4. С.8 –12.
Il'ichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. New Methods for Measuring Building Deformations and Criteria for Their Assessment // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2003. No. 4. P. 8–12.
 13. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S. Methods for the Determination of Curvatures and the Difference Between the Slopes of Foundations as the Criteria of Deformation of the Basements of Buildings and Structures // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. Vol. 55, Iss. 3. P. 168–172. DOI: 10.1007/s11204-018-9521-5
 14. Шашкин В.А. Накопленные деформации исторической застройки Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2023. №12. С32–45.
Shashkin V.A. Accumulated Deformations of the Historical Buildings in Saint Petersburg // Housing Construction. 2023. No. 12. P. 32–45.
 15. Разводовский, Д. Е., А. А. Чепурнова Оценка влияния усиления фундаментов зданий по технологии струйной цементации на их осадку // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №10. С. 64–72.

- Razvodovsky D.E., Chepurnova A.A. Assessment of the Influence of Jet-Grouting Foundation Strengthening on Building Settlements // Industrial and Civil Engineering. 2016. No. 10. P. 64–72.
16. Разводовский Д.Е., Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А. Реконструкция исторического здания Средних торговых рядов под музей Московского Кремля: Герсевановские чтения 28 сентября, 2023 г., М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова.
Razvodovsky D.E., Zekhniev F.F., Vnukov D.A. Reconstruction of the Historical Middle Trading Rows Building as a Museum of the Moscow Kremlin: Gersevanov Readings, September 28, 2023. Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Foundations and Underground Structures (NIIOOSP).
17. Разводовский Д.Е., Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А. Применение jet-grouting для усиления фундаментов и грунта основания. Ретроспектива: Петрухинские чтения «Усиление оснований и фундаментов» 25-26 мая 2023 г., М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова.
Razvodovsky D.E., Zekhniev F.F., Vnukov D.A. Application of Jet-Grouting for Strengthening Foundations and Subsoil: A Retrospective View: VIII Petrukhin Conference “Reinforcement of foundations and bases”, May 25–26, 2023. Moscow: N.M. Gersevanov Research Institute of Foundations and Underground Structures (NIIOOSP).

Информация об авторах

Надежда Сергеевна Никифорова, доктор технических наук, профессор Московского государственного строительного университета, Москва, Российская Федерация
Email: n-nikiforova@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0611-4354

Даниил Дмитриевич Пирогов, аспирант, Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
Email: daniel2000mail@mail.ru

Дмитрий Евгеньевич Разводовский, кандидат технических наук, Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация
Email: 79165206707@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-3732-1070

Information about authors

Nadezhda S. Nikiforova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
Email: n-nikiforova@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0611-4354

Daniil D. Pirogov, Postgraduate Student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
Email: daniel2000mail@mail.ru

Dmitry E. Razvodovsky, Candidate of Technical Sciences, JSC “Scientific Research Center Construction” – Scientific Research, Design, Surveying and Technological Institute of Foundations and Underground Structures named after N. M. Gersevanov, Moscow, Russian Federation
Email: 79165206707@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-3732-1070

Дата поступления: 28.04.2025

Дата принятия: 22.10.2025