

СТАТЬИ

УДК 528.31/35:004.9
DOI 10.17513/use.38470

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ УЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ СОПРОВОЖДЕНИИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Михайлов А.А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет геодезии и картографии», Москва,
Российская Федерация, e-mail: artmihailov2000@gmail.com*

Работа посвящена проблеме учета перемещений высотных зданий под влиянием внешних факторов, таких как солнечная радиация. Целью работы является исследование возможности применения метода конечных элементов в программном комплексе «ЛИРА-САПФИР» для моделирования температурных деформаций с целью их учета при геодезическом сопровождении строительства. Материалом исследования послужило 23-этажное монолитное железобетонное здание высотой 90 м. Методы исследования включали построение трехмерной конечно-элементной модели здания, проведение натурных геодезических измерений координат контрольных марок электронным тахеометром в различных температурных условиях и последующее сравнение измеренных перемещений с результатами компьютерного моделирования. Результаты показали, что расчетные перемещения, полученные по модели, коррелируют с фактическими измерениями, при этом наибольшие расхождения наблюдались для марок, расположенных на верхних этажах. Анализ позволил установить, что эти расхождения могут быть связаны с постоянно изменяющейся погрешностью геодезических измерений из-за большого угла падения луча на верхние марки и влияния рефракции. В заключение отмечено, что компьютерное моделирование является перспективным инструментом для учета температурных деформаций каркаса высотного здания. Для повышения точности метода требуются доработка модели, применение специальной отражательной аппаратуры и учет рефракционных эффектов при высокоточных натурных измерениях.

Ключевые слова: температурные деформации, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, высотное здание, геодезический мониторинг, программный комплекс «ЛИРА-САПФИР»

APPLICATION OF COMPUTER MODELING FOR ACCOUNTING FOR THERMAL DEFORMATIONS OF HIGH-RISE BUILDINGS DURING GEODETIC SUPPORT OF CONSTRUCTION

Mikhaylov A.A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Moscow State University of Geodesy and Cartography”, Moscow,
Russian Federation, e-mail: artmihailov2000@gmail.com*

The paper addresses the problem of accounting for displacements of high-rise buildings under the influence of external factors such as solar radiation. The aim of the work is to investigate the possibility of applying the finite element method in the “LIRA-SAPR” software complex for modeling thermal deformations to account for them during geodetic support of construction. The research material was a 23-story monolithic reinforced concrete building with an architectural height of 90 meters. Research methods included building a three-dimensional finite element model of the building, conducting field geodetic measurements of control mark coordinates with an electronic total station under different temperature conditions, and subsequent comparison of measured displacements with the results of computer modeling. The results showed that the calculated displacements obtained from the model correlate with actual measurements, with the greatest discrepancies observed for marks located on the upper floors. The analysis established that these discrepancies could be related to the increasing error of geodetic measurements due to the larger angle of incidence of the beam on the upper marks and the influence of refraction. In conclusion, it is noted that computer modeling is a promising tool for accounting for thermal deformations of a high-rise building frame. To improve the accuracy of the method, refinement of the model is required, as well as the use of special reflective equipment and accounting for refraction effects during high-precision field measurements.

Keywords: thermal deformations, computer modeling, finite element method, high-rise building, geodetic monitoring, software complex “LIRA-SAPR”

Введение

На данный момент основным направлением развития крупных городов является строительство высотных и сверхвысотных многофункциональных комплексов. Объекты такого типа требуют особого подхода к геодезическому обеспечению их воз-

ведения [1]. Важнейшей задачей является обеспечение вертикальности сооружения и соосности его несущих элементов. Но высотные здания не остаются неподвижными в течение всего времени строительства. Под действием различных факторов, таких как неравномерный нагрев несущих кон-

струкций и ветровая нагрузка, здания могут испытывать значительные вертикальные и горизонтальные перемещения даже в течение суток.

Одним из решений поставленной выше задачи является комплексное использование геотехнических датчиков, спутниковой геодезической аппаратуры и электронных тахеометров¹ [2; 3]. Практическая эффективность такого комплексного подхода, сочетающего ГНСС-наблюдения и высокоточные тахеометрические измерения для мониторинга крена высотных зданий, подтверждена экспериментальными исследованиями [4]. При этом использование GNSS-технологий, интегрированных в системы мониторинга, позволяет обеспечить независимую от высоты точность и постоянный контроль деформаций, что особенно важно для уникальных высотных объектов [5]. Но такое решение требует большого количества аппаратуры, специального программного обеспечения и большого числа высококвалифицированных геодезистов. Кроме того, практика показывает, что даже успешные методики, примененные на знаковых объектах (например, система мониторинга Бурдж-Халифа), не всегда могут быть напрямую адаптированы к другим стройплощадкам из-за уникальных архитектурных, технологических и климатических условий, что требует разработки новых специализированных решений [6]. Также разрабатываются методики, позволяющие определять деформации высотных зданий при помощи анализа спутниковых фотоснимков [7].

Особое внимание уделяется учету температурных деформаций и деформаций, вызванных ветровой нагрузкой [8; 9]. Актуальность этой задачи подчеркивается тем, что в реальных условиях неравномерный нагрев конструкций солнцем приводит к значительным деформациям изгиба, величина которых для высотных зданий может существенно превышать точность, регламентированную нормами на производство геодезических работ [10].

Альтернативным решением может стать компьютерное моделирование деформаций железобетонных конструкций. Работы по моделированию деформаций зданий и работе железобетонных конструкций [11; 12] ведутся достаточно давно.

Основой для моделирования может служить метод конечных элементов (МКЭ), широко применяемый для задач проектирования и расчета несущих конструкций. Данный метод лежит в основе ряда программных комплексов, таких как ПК «ЛИРА-САПФИР», RSTAB 9, SCAD и др. Вопросу о возможности применения подобных программных комплексов для задач моделирования и учета температурных деформаций посвящена данная работа.

Цель исследования – изучение возможности применения компьютерного моделирования и расчетов по методу конечных элементов для задачи учета температурных деформаций высотных железобетонных зданий при геодезическом сопровождении строительства.

Материалы и методы исследования

Прежде всего необходимо определить понятие «моделирование» в соответствии с нормативными документами. Для этого обратимся к ГОСТ Р 57412–2017 [13]. Согласно [13]:

- *модель*: сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира;

- *объект моделирования*: явление, объект или свойство объекта реального мира;

- *моделирование*: изучение свойств и/или поведения объекта моделирования, выполненное с использованием его моделей;

- *математическая модель*: модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений;

- *компьютерная модель (электронная модель)*: модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

В основе любой модели заложен некоторый математический аппарат. Определить поведение объекта моделирования или его свойства в заданных условиях можно, либо используя формулы, описывающие физику происходящих в нем процессов, либо используя выражения для интерполяции/экстраполяции некоторых величин, основываясь на экспериментальных данных. Подход, основанный на применении формул, описывающих физику процесса теплового расширения высотных зданий и сооружений, применяется для решения геодезических задач довольно давно. Так, в диссертации В.Я. Раинкина «Геодезические работы

¹ CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat). Инжиниринг самого высокого здания в мире: Бурдж Дубай / пер. с англ. [Электронный ресурс]. URL: <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1326-engineering-the-worlds-tallest-burj-bubai.pdf> (дата обращения: 14.11.2025).

при строительстве и эксплуатации высотных сооружений башенного типа: на примере Останкинской телевизионной башни» [14, с. 99–163] рассмотрены основные принципы учета перемещений высотных зданий, вызываемых температурными факторами.

В настоящее время этот метод дополнен и усовершенствован. Сейчас для учета деформаций, вызванных температурными факторами, может применяться метод конечных элементов (МКЭ). Согласно ГОСТ Р 57188-2016 [15] *Метод конечных элементов – сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой*. Опираясь на приведенное определение, можно описать суть МКЭ более просто: *расчетную область* (деталь, конструкцию, объем) разбивают на множество простых мелких частей – «конечных элементов», которые вместе образуют сетку; *искомая сложная функция* (например, поле перемещений, температур или давлений) аппроксимируется внутри каждого такого элемента с помощью простых кусочно-гладких функций (полиномов); затем для всей системы элементов составляется и решается глобальная *система алгебраических уравнений*. Ее решение дает приближенные значения искомой функции в узлах сетки и внутри элементов.

Для моделирования и дальнейшей проверки работоспособности модели было выбрано каркасное 23-этажное здание из монолитного железобетона, с архитектурной высотой 90 м. В соответствии с СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» данное здание является высотным, так как имеет высоту более 75 м. Таким образом выбор здания соответствует задачам исследования.

Для моделирования выбран программный комплекс «ЛИРА-САПФИР». Данный программный комплекс имеет весь необходимый функционал для создания трехмерной модели здания, преобразования модели в модель с конечными элементами, задания и расчета нагрузок и вычисления перемещения узлов. Также важно отметить удобный и интуитивно понятный (для опытного пользователя САПР) интерфейс, а также наличие свободно распространяемой некоммерческой версии программы. Важным фактором является и наличие статей по верификации

расчетов, выполняемых данным программным комплексом. Данные материалы доступны на официальном сайте программного комплекса. Также применение программного комплекса «ЛИРА» для задач учета температурных деформаций описано в [16]. Возможности современных программных комплексов, включая «ЛИРА-САПФИР», позволяют учитывать поэтапность возведения зданий, что является критически важным для точного моделирования их напряженно-деформированных состояний на всех стадиях жизненного цикла [17].

Для полевых работ использовались следующие приборы:

1. Электронный тахеометр Leica TS06 R500. Основные характеристики:

- a) точность угловых измерений 5»;
- b) компенсатор двухосевой, диапазон работы $\pm 4'$;
- c) дальность измерения на одну призму 1,3–3500 м;
- d) точность линейных измерений на одну призму $\pm 1,5 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$;
- e) дальность измерения на отражающую пленку 1,3–400 м;
- f) точность линейных измерений на отражающую пленку $\pm 1,5 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$;
- g) дальность измерений без отражателя 0,3–500 м;
- h) точность линейных измерений без отражателя $\pm 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$;
- i) увеличение зрительной трубы 30х.

2. Пирометр RGK PL-7 MAX.

Использование высокоточных электронных тахеометров серии Leica TS, включая более ранние модели (например, TS09), является стандартной практикой при геодезическом сопровождении строительства уникальных и высотных объектов, что подчеркивает их роль в обеспечении точности разбивочных работ и мониторинга [18].

Результаты исследования и их обсуждение

Как было сказано выше, моделирование будет выполняться в программном комплексе «ЛИРА-САПФИР». Данный комплекс состоит из двух программ: «ЛИРА-САПР» и «САПФИР». Непосредственное создание модели по рабочей документации выполнено в программе «САПФИР». При этом работа ведется с такими элементами, как стена, колонна, балка и плита перекрытия, которые не являются конечными элементами и не подходят для расчетов нагрузок и перемещений. Моделирование велось в следующем порядке:

1. Создание строительных осей здания.

2. Создание нового этажа и отрисовка вертикальных несущих конструкций (стен).

3. Создание горизонтальных несущих конструкций (плит).

4. Создание типового этажа и отрисовка вертикальных несущих конструкций (стен и колонн).

5. Копирование типового этажа и редактирование вертикальных несущих конструкций для нетиповых этажей.

В результате моделирования по данным рабочей документации автором была получена полная модель здания (рис. 1) в программе «САПФИР», которая входит в комплекс «ЛИРА-САПФИР»

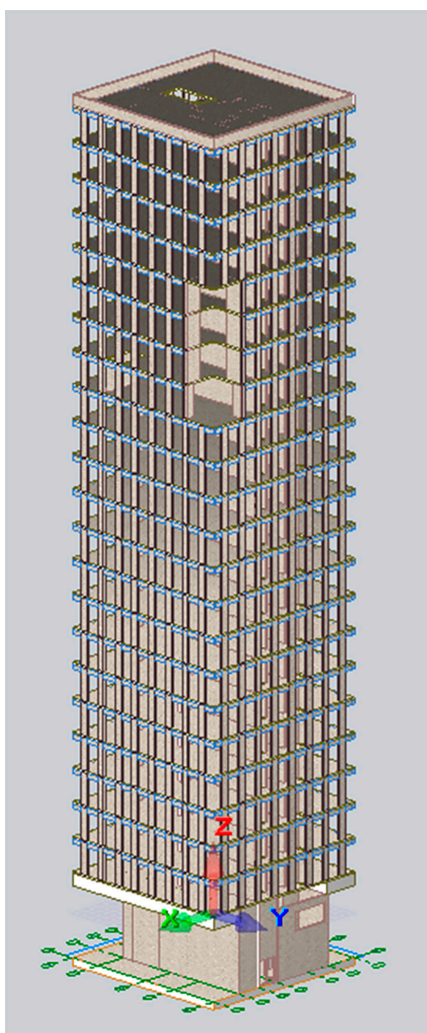


Рис. 1. Полученная модель здания
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Важно отметить, что в процессе отрисовки несущих конструкций задавались параметры бетона, соответствующие параметрам, указанным в рабочей документации.

После создания трехмерной модели здания был выполнен ее экспорт в ЛИРА-САПР с преобразованием всех элементов модели в конечные элементы, такие как стержни, узлы и т.п. Модель в конечных элементах представлена на рис. 2.

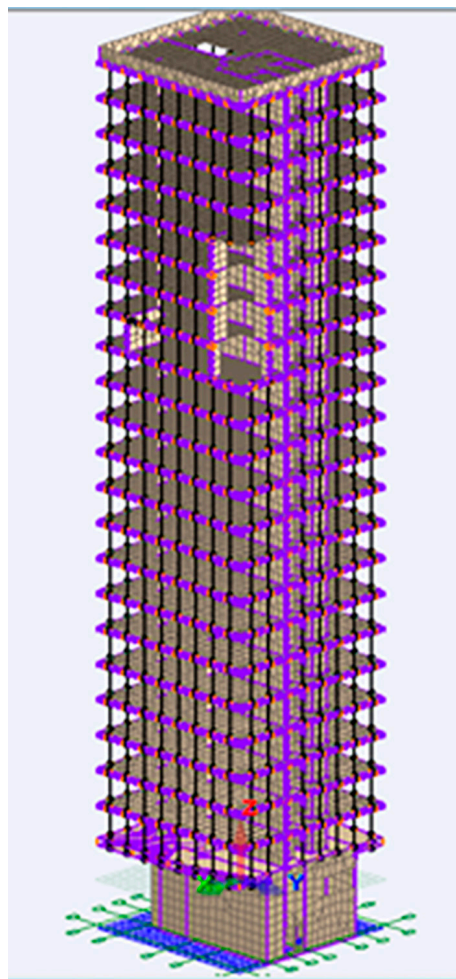


Рис. 2. Модель в конечных элементах
Примечание: составлен автором по результатам исследования

На этом первая задача исследования была выполнена: получена трехмерная модель здания, подходящая для расчета нагрузок и перемещений. Далее проводились полевые работы по определению фактических перемещений марок-катафотов, закрепленных на здании. Схема расположения марок приведена на рис. 3.

Измерения положения геодезических марок, размещенных на здании, выполнялись электронным тахеометром относительно исходных пунктов, закрепленных на несущих стенах первого этажа моделируемого здания.

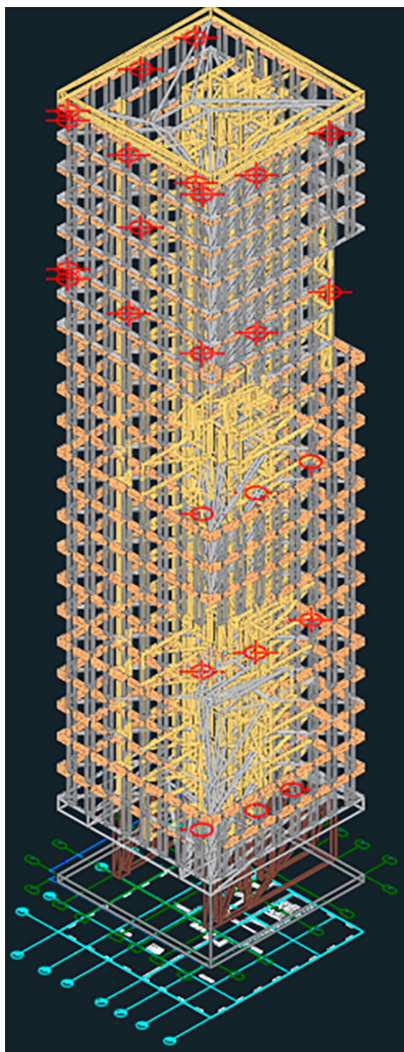


Рис. 3. Схема расположения марок на здании
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Для определения исходного положения пунктов измерения проводились в пасмурную погоду, когда температура всех элементов здания была одинакова и составляла $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для определения деформаций измерения проводились в ясную погоду, когда часть здания была освещена солнцем. Также

в этот момент выполнялись измерения температуры несущих элементов здания при помощи пирометра. Для более детального и непрерывного контроля температурного поля конструкции, являющегося ключевым фактором ее деформаций, перспективно применение беспроводных сенсорных систем мониторинга, позволяющих отслеживать распределение температуры в реальном времени [19].

После этого выполнялось моделирование по данным измерения температуры, вычислялись координаты марок в деформированном состоянии, путем сложения координат в недеформированном состоянии и величин перемещений из таблицы перемещений. Моделирование выполняется путем задания соответствующих нагрузок. В данном случае, помимо стандартных нагрузок от собственного веса здания, была задана нагрузка на стержни, называемая в программе «Неравномерный нагрев».

После этого выполнялся расчет при помощи соответствующей команды. После расчета формируются стандартные таблицы отчета, среди которых для данной работы необходима только таблица перемещений.

Марки были размещены на колоннах, которые после экспорта в ЛИРА-САПР были преобразованы в стержни. Места примыкания колон и плит перекрытий преобразованы в узлы. В результате расчета программа позволяет сформировать таблицу перемещений узлов по каждой оси координат. Но так как марки расположены не в узлах, а между ними, то для того, чтобы получить перемещение марки, необходимо выполнить интерполирование величины перемещения по каждой оси между двумя узлами. После этого, прибавив к исходным координатам вычисленные перемещения, были получены координаты марок в деформированном состоянии.

Также рассмотрим структуру таблицы «Перемещения», полученной в результате моделирования (таблица).

Структура таблицы «Перемещения»

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	ЗАГР	УЗЕЛ	X, мм	Y, мм	Z, мм	UX, RD*1000	UY, RD*1000	UZ, RD*1000
2	1 -dT							
3	1	3765	1,12345	0,22235	2,55461	-0,04885	0,22144	-0,66511

Примечание: составлена автором на основе таблицы «Перемещения» программного комплекса «ЛИРА-САПФИР».

Столбец 1 – номер загрузки, обозначает тип нагрузки, вызывающей указанные в следующих столбцах перемещения; 2 – номер узла модели; 3, 4, 5 – перемещения узла из столбца 2 по соответствующим координатам (линейные перемещения в мм), 6, 7, 8 – угловая составляющая перемещения в данном узле.

Для определения перемещений геодезического знака, закрепленного на колонне, необходимо выполнить линейную интерполяцию.

$$X_a = \frac{x_{1a} + x_{2a}}{2}, \quad (1)$$

где X_a – перемещение отражателя по одной из координат, x_{1a} – перемещение первого узла по соответствующей координате, x_{2a} – перемещение второго узла по той же координате. Важно отметить, что формула (1) справедлива только для случая, когда геодезический знак закреплен в середине колонны. Система координат – локальная система программного комплекса, оси координат параллельны строительным осям здания. Для вычисления полных перемещений геодезического знака с учетом угловых величин необходимо воспользоваться следующими формулами:

$$U_{xC} = \frac{(U_{xA} + U_{xB})}{2}, \quad (2)$$

$$U_{yC} = \frac{U_{yA} + U_{yB}}{2} + \left(\frac{L}{8}\right) \cdot (\theta_{zA} - \theta_{zB}), \quad (3)$$

$$U_{zC} = \frac{U_{zA} + U_{zB}}{2} + \left(\frac{L}{8}\right) \cdot (\theta_{yB} - \theta_{yA}), \quad (4)$$

где U_{xC} , U_{yC} , U_{zC} – полные перемещения середины стержня, U_{xA} , U_{yA} , U_{zA} – линейные перемещения узла начала стержня (по таблице) U_{xB} , U_{yB} , U_{zB} – линейные перемещения узла конца стержня (по таблице), L – длина стержня, θ_{zA} , θ_{zB} , θ_{yB} , θ_{yA} – величины угловых перемещений вдоль соответствующих осей (по таблице). Для первичной проверки модели угловые величины перемещений в узлах не учитывались.

Также важным моментом является оценка точности измерений, выполненных для проверки модели. Положение марок, размещенных на здании, определялось относительно базиса, закрепленного на несущих конструкциях первого этажа того же здания. Этот подход выбран, так как несущие конструкции первого этажа наименее подвержены неравномерному нагреву ввиду расположения здания, а также на их положение не влияют ветровая нагрузка и колебания, вызываемые подъемными механизмами. Также для данной задачи нельзя закреплять точки базиса вне исследуемого здания, так как осадки здания и другие виды деформаций в этом случае будут значительно влиять на качество измерений.

Прибор ориентируется относительно базиса методом обратной линейно-угловой засечки, который широко исследуется и применяется для задач деформационного мониторинга [20]. Схема засечки представлена на рис. 4.

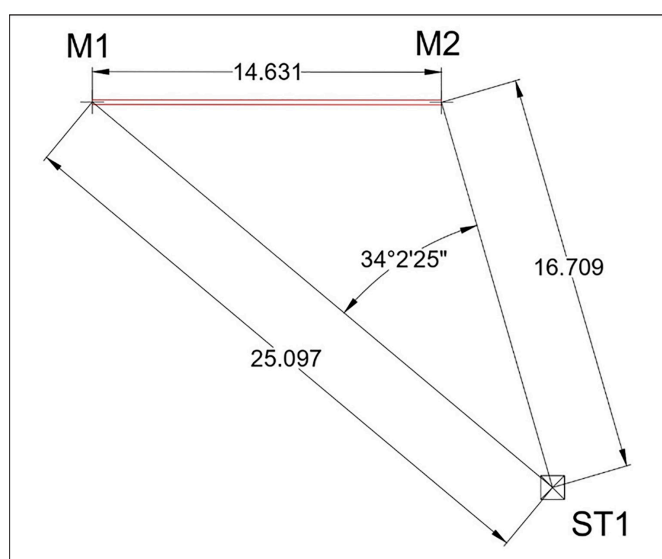


Рис. 4. Схема засечки

Примечание: составлен автором по результатам исследования

На схеме ST1 – станция, место установки электронного тахеометра, M1 и M2 – точки базиса. Далее, можно принять координаты базиса безошибочными. Для оценки точности планового положения пункта ST1 воспользуемся формулой [21, с. 208–213]:

$$m_{ST} = \frac{1}{\sin \gamma} \sqrt{\left(\frac{m_{\beta}}{\rho''} \times \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right)^2 + \frac{(m_{s1}^2 + m_{s2}^2)}{2} \right)}, \quad (5)$$

где $\sin \gamma$ – измеренный угол между направлениями ST1-M1 и ST1-M2, m_{β} – СКП измерения угла, $\rho'' = 206265''$, S_1 , S_2 – расстояния ST1-M1 и ST1-M2 соответственно, m_{s1} , m_{s2} – СКП измерения расстояний ST1-M1 и ST1-M2 соответственно.

СКП измерения угла принята из технических характеристик прибора, она составляет 5". СКП измерения расстояний также указана в технических характеристиках прибора, с учетом длин измеряемых линий получено следующее значение: $m_{s1} = m_{s2} = 1,5$ мм. Измеренные величины указаны на рис. 4. Тогда, подставив все имеющиеся значения в формулу (5), $m_{ST} = 3$ мм.

Также нужно оценить точность определения высоты прибора относительно базиса методом тригонометрического нивелирования. Для этого была использована следующая формула [22, с. 752]:

$$m_{Hst}^2 = \frac{1}{2} \cdot (m_l^2 + m_i^2) + \frac{1}{4} \cdot (\sin^2(v_1) \cdot m_{s1}^2 + \sin^2(v_2) \cdot m_{s2}^2) + \frac{1}{4} \cdot \left(\left(\frac{S_1}{\cos(v_1)} \right)^2 + \left(\frac{S_2}{\cos(v_2)} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right) + \frac{1}{2} \cdot (m_{H1}^2 + m_{H2}^2) \quad (6)$$

где m_l – погрешность измерения высоты отражателя, m_i – погрешность измерения высоты прибора, v_1 , v_2 – измеренные вертикальные углы, m_v – СКП измерения вертикального угла, m_{H1} , m_{H2} – СКП высотных отметок исходных точек. Развитие методик высокоточного тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров позволяет достигать точности, сопоставимой с геометрическим нивелированием II–IV классов, что подтверждает обоснованность его применения для оценки высотных отметок в деформационном мониторинге [23]. Для рассматриваемой ситуации примем m_l и m_i равными нулю, так как исходные пункты представляют собой геодезические марки, а высота прибора совпадает с высотой определяемой точки, $m_v = m_{\beta}$, S_1 , S_2 указаны на рис. 4, $v_1 = 4^\circ 30' 08''$, $v_2 = 7^\circ 6' 9''$, m_{H1} , m_{H2} примем равными 1 мм. Тогда $m_{Hst} = 1$ мм.

Далее была рассчитана точность измерения координат определяемой точки, по следующим формулам [21, с. 214–215]:

$$m_{Xp}^2 = m_{Xst}^2 + (\cos v \cdot \cos \beta)^2 \cdot m_s^2 + (-S_p \cdot \cos v \cdot \sin \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_{\beta}}{\rho} \right) + (-S_p \cdot \sin v \cdot \cos \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right)^2, \quad (7)$$

$$m_{Yp}^2 = m_{Yst}^2 + (\cos v \cdot \sin \beta)^2 \cdot m_s^2 + (S_p \cdot \cos v \cdot \cos \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_{\beta}}{\rho} \right)^2 + (S_p \cdot \sin v \cdot \sin \beta)^2 \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right)^2, \quad (8)$$

$$m_{Hp}^2 = m_{Hst}^2 + \sin^2 v \cdot m_s^2 + (S_p \cdot \cos v)^2 \cdot \left(\frac{m_v}{\rho} \right)^2 + m_l^2 + m_i^2, \quad (9)$$

где m_{Xst} , m_{Yst} , m_{Hst} – СКП определения координат станции, S_p – расстояние от станции до определяемой точки, β – дирекционный угол направления на точку P, v – измеренный вертикальный угол. Для точки, расположенной на 18 этаже, примем: $S_p = 81,943$ м., $\beta = 355^\circ 37' 39''$, $v = 67^\circ 27' 05''$, $m_{Xst} = m_{Yst} = 3$ мм., $m_{Hst} = 1$ мм. Подставив указанные значения в формулы (7)–(8), после извлечения корня получены следующие значения: $m_{Xp} = 3$ мм, $m_{Yp} = 3$ мм., $m_{Hp} = 2$ мм.

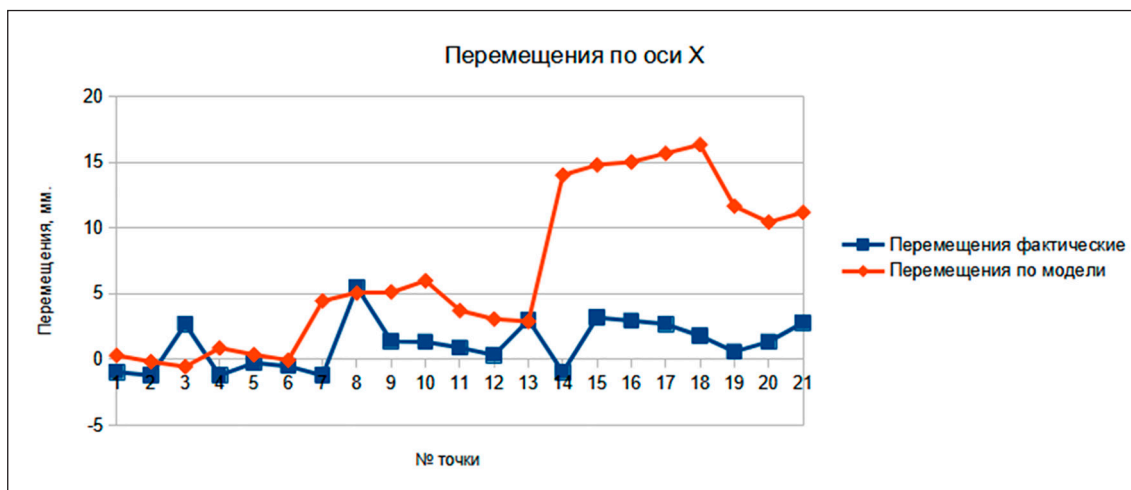


Рис. 5. Диаграмма перемещений по оси X
Примечание: составлен автором по результатам исследования



Рис. 6. Диаграмма перемещений по оси Y
Примечание: составлен автором по результатам исследования

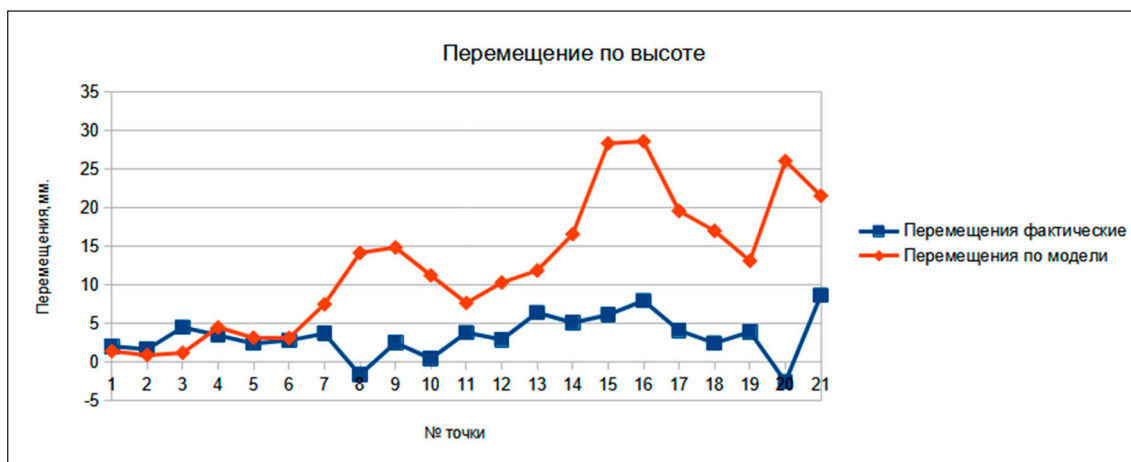


Рис. 7. Диаграмма перемещений по высоте
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Наиболее удобным для анализа форматом представления данных является диаграмма. Ниже представлены линейные диаграммы величин перемещения марок по каждой оси (рис. 5–7). На каждой обозначены как фактические перемещения, так и перемещения, рассчитанные по модели. Величины перемещений на диаграммах указаны в мм.

Результаты показали, что расчетные перемещения, полученные по модели, коррелируют с фактическими измерениями, при этом наибольшие расхождения наблюдались для марок, расположенных на верхних этажах. Подобные исследования, сочетающие непрерывный мониторинг деформаций в процессе строительства с верификацией конечно-элементных моделей, учитывающих реологические свойства бетона и условия строительства, также подтверждают хорошую корреляцию между расчетом и экспериментом для сверхвысоких зданий [24]. Увеличение расхождения данных модели и измерений может быть связано с тем, что марки с большим порядковым номером расположены на более высоких этажах. С учетом того, что все измерения проводились с земли, а марки расположены вертикально на колонах, можно предположить, что большое расхождение фактических данных и данных модели связано с большими погрешностями измерений более высоких марок, так как угол падения визирного луча на марки разных этажей различный, что, в свою очередь, вызывает дополнительные погрешности [25]. Экспериментальные исследования подтверждают, что при измерении расстояний в безотражательном режиме на больших углах падения луча (более 40–50°) может возникать систематическая ошибка, что особенно актуально для высоко расположенных марок [26]. Кроме того, при дальнейшей работе над темой необходимо учитывать влияние вертикальной рефракции по алгоритму, предложенному в [27].

Однако, несмотря на большие расхождения перемещений для более высоких марок, для марок нижних этажей расхождения небольшие. С учетом вышесказанного можно сказать, что модель является работоспособной, хоть и требует некоторой доработки, а также необходимо провести эксперимент, который позволит уменьшить погрешности измерения марок на верхних этажах. Перспективным направлением для повышения достоверности геодезического мониторинга высотных зданий является интеграция данных конечно-элементного моделирования

с показаниями автоматизированных стационарных систем контроля, например, на основе волоконно-оптических датчиков [28].

Выводы

- Данные компьютерного моделирования позволяют получать информацию о деформациях железобетонного каркаса здания, вызванных тепловым расширением.
- Построенная модель требует доработки, для улучшения моделирования вертикальной составляющей деформаций.
- Для получения более надежных данных измерений, на высоких этажах необходимо разместить уголкового пленочные отражатели или призматические отражатели.

Список литературы

1. Жидков А.А., Васютинский И.Ю., Васютинская С.И. Современные технологии геодезического обеспечения высотного строительства // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 6. С. 10–16. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-972-6-10-16. EDN: OMFCJV.
2. Яценко А.И., Евстафьев О.В., Брынь М.Я. Геоинформационное обеспечение возведения башни «Бурж Дубай» // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 25–28. EDN: LLSRZZ. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geoinformatsionnoe-obespechenie-vozvedeniya-bashni-burzh-dubay> (дата обращения: 28.12.2025).
3. Иксанов Р.Р., Ермолаева Т.Н. Проблемы геодезического сопровождения строительства высотных сооружений с применением современных технологий // Избранные доклады 67-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых: Доклады конференции студентов и молодых ученых (Томск, 19–23 апреля 2021 г.). Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 913–914. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46642129> (дата обращения: 21.11.2025). EDN: BEQMRR.
4. Шульц Р.В., Анненков А.А., Белоус Н.В., Ковтун В.Я. Комплексный геодезический мониторинг высотных зданий // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. № S. С. 109–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-geodezicheskiy-monitoring-vysotnyh-zdaniy> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: TPIIZT.
5. Bochko O., Rii I., Bida O. Geodesic support of construction of high-rise buildings using GPS // InterConf. 2021. № 67. P. 486–492. DOI: 10.51582/interconf.19-20.07.2021.049.
6. Khatib K. Surveying engineering challenges in the construction of skyscrapers. High rise Tower survey and monitoring on Lamar twins building in Jeddah, KSA // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Vol. S. P. 79–89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/surveying-engineering-challenges-in-the-construction-of-skyscrapers-high-rise-tower-survey-and-monitoring-on-lamar-twins-building-in-jeddah> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: VXKQYZ.
7. Zhou Yu., Chen J., Hao G., Zhu Sh. Deformation Monitoring of High-Rise Building Clusters: Acquiring Deformation Coefficients by Combining Satellite Imagery and Persistent Scatterer Interferometry // Structural Control and Health Monitoring. 2024. Vol. 2024. Is. 1. DOI: 10.1155/2024/2326106. EDN: XN-QAKS.
8. Рубцов И.В., Назаров И.А., Лавриненко Е.Д., Савушкина В.П. Учет температурных деформаций при геодезическом сопровождении строительства высотных монолитных зданий // Вестник МГСУ. 2010. № 4–5. С. 329–334. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21102432> (дата обращения: 30.12.2025). EDN: RTUKDZ.

9. Gao K., Deng D., Zhu H. et al. Static and Dynamic Deformation Monitoring of Super High-Rise Buildings During the Construction Stage // *Industrial Construction*. 2024. Vol. 54. Is. 1. P. 130–139. DOI: 10.3724/j.gjzgj23081112. EDN: UHBXDK.
10. Demianenko R., Annenkov A., Bondar S. et al. Analysis of the influence of external factors on the deformation of high-rise buildings in the process of their construction and operation // *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2024. Vol. 112. P. 222–228. DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.222-228. EDN: UTUQTC.
11. Банах В.А. Моделирование работы строительных конструкций эксплуатируемых зданий при передаче динамических воздействий через грунтовый массив // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2011. № 39. С. 18–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21771476> (дата обращения: 23.11.2025). EDN: SILBGP.
12. Новиков Ю.А., Хорошилов В.С., Мальцева Т.В. Прогноз деформационного процесса по геодезическим наблюдениям на основе кинематической модели // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2025. Т. 30. № 2. С. 36–46. DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-2-36-46. EDN: NVUVVN.
13. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2017.
14. Раинкин В.Я. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации высотных сооружений башенного типа: на примере Останкинской телевизионной башни: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1972. 203 с. Шифр хранения: ОД Дк 73-5/3979.
15. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.
16. Сивец Б.О. Влияние температурных воздействий на монолитные железобетонные плиты / науч. рук. В.В. Гринев // *Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций: материалы 70-й студенческой научно-технической конференции* (г. Минск, 12 мая 2014 г.). Минск: БНТУ, 2015. С. 127–130. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/532402339.pdf> (дата обращения: 29.12.2025).
17. Уткина В.Н., Безрукова Е.С. Моделирование процесса возведения высотного каркасно-монолитного здания // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 4 (7). С. 82–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protssessa-vozvedeniya-vysotnogo-karkasno-monolitnogo-zdaniya> (дата обращения: 28.12.2025). DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10040. EDN: OKYDCA.
18. Поленников Д.П. Применение электронного тахеометра Leica TS09 plus при строительстве уникальных объектов // *Вестник магистратуры*. 2016. № 12–4 (63). С. 17–20. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-elektronno-go-taxeometra-leica-ts09-plus-pri-stroitelstve-unikalnyh-obektov> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: XSHKGP.
19. Wang T., Li D., Zhou J., Zhang J. Temperature Monitoring of Mass Concrete Structure Using Wireless Sensing System // *Structural Control and Health Monitoring*. 2025. Vol. 2025. Article ID 7847074. DOI: 10.1155/stc/7847074.
20. Горяинов И.В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2018. Т. 23. № 1. С. 28–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-primeneniya-obratnoy-lineynoy-uglovoy-zasechki-dlya-otsenki-stabilnosti-punktov-planovoy> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: YWRBRQ.
21. Инженерная геодезия: учеб. для студентов вузов / Ключин Е.Б., Климов М.И., Михелев Д.Ш., Фельдман В.Д.; Под ред. Д.Ш. Михелева. 4-е изд., испр. М.: Академия, 2004. 478 с. ISBN 5-7695-1524-4.
22. Справочник геодезиста: в 2 книгах. Кн. 2 / под ред. В.Д. Большакова, Г.П. Левчука. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1975. 1056 с.
23. Береговой Д.В. Исследование и разработка методики тригонометрического нивелирования повышенной точности // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 12–1 (54). С. 77–79. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-i-razrabotka-metodiki-trigonometricheskogo-nivelirovaniya-povyshennoy-tochnosti> (дата обращения: 28.12.2025). DOI: 10.18454/IJ.2016.54.014. EDN: XENZPT.
24. Gao F., Zhou H., Liang H. et al. Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 110033. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110033. EDN: TXFOOP.
25. Швидкий В.Я., Сумин М.Н., Яндров И.А., Алламырадов Э.М. Влияние перпендикулярности визирного луча электронного тахеометра к светоотражательной плоскости марки на точность измерения расстояний // *Транспортное строительство*. 2017. № 4. С. 19–21. EDN: ZHJYJP.
26. Никонов А.В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // *Вестник Сибирской государственной геодезической академии*. 2015. № 1 (29). С. 43–53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnosti-izmereniya-rass-toyany-elektronnyimi-taxeometrami-v-bezotrazhatelnom-rezhime> (дата обращения: 28.12.2025). EDN: UJYBKF.
27. Вшивкова О.В., Решетило С.Ю. Комбинированный способ учета влияния вертикальной рефракции в электронной тахеометрии // *Геодезия и картография*. 2019. Т. 80. № 11. С. 15–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-953-11-15-21.
28. Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Измерительные системы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений // *Строительство: наука и образование*. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritelnye-sistemy-dagnostiki-i-monitoringa-tehnicheskogo-sostoyaniya-unikalnyh-zdaniy-i-sooruzheniy> (дата обращения: 28.12.2025). DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2. EDN: YLXHCD.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.