

УДК 528.3:551.5

ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Грачев Г.Д.¹, Башмакова К.П.², студенты гр. КНб-231, III курс

Научный руководитель: Винтер В.В.¹, ст. преподаватель

¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Высотное строительство требует повышенной точности геодезических работ, поскольку даже небольшие ошибки в определении высотных отметок могут привести к значительным отклонениям конструкций на верхних этажах. Одним из факторов, влияющих на точность высокоточного нивелирования, является атмосферная рефракция. Это преломление светового луча в слоях воздуха с различным показателем преломления.

Рефракция зависит от температуры, влажности, давления и вертикальных градиентов воздуха. При измерениях на больших высотах и длинных пролетах световой луч проходит через разные слои атмосферы, что приводит к систематическим ошибкам.

Задача геодезиста, при строительстве высотных зданий, учесть влияние рефракции и применять методы компенсации для обеспечения точности нивелирования, необходимой для безопасного и долговечного возведения сооружения.

Цель данной статьи - проанализировать влияние рефракции на результаты высокоточного нивелирования при строительстве высотных зданий и предложить методы уменьшения ошибок.

Суть явления рефракции в том, что световой луч, проходя через воздушную среду с неодинаковой плотностью, искривляется и перестает быть идеально прямым. Причина этого явления кроется в неоднородности атмосферы.

Во-первых, плотность воздушных масс непостоянна: с набором высоты меняются ключевые параметры среды - температура, давление и влажность. Это меняет и показатель преломления, заставляя луч нивелира искривляться при прохождении сквозь слои разной плотности.

Во-вторых, большое значение имеют температурные градиенты. Резкая разница температуры между соседними слоями воздуха создаёт преломление, из-за которого сильнее искривляется траектория света. На протяженных дистанциях это влияние накапливается и становится особенно заметным.

В-третьих, хотя влажность и давление оказывают менее выраженное действие, чем температура, их колебания тоже влияют на общую картину преломления.

В результате атмосферная рефракция может вызвать искажение видимой высоты точки: линии визирования нивелира кажутся выше или ниже ре-

ального положения, что особенно критично при высокоточном нивелировании на больших высотах.

Влияние температуры, давления и влажности на прохождение луча нивелира проявляется через изменение показателя преломления воздуха вдоль линии визирования. Наиболее значимым фактором является температура: при повышении температуры плотность воздуха уменьшается, вследствие чего показатель преломления снижается, и луч нивелира изгибается вниз. Вертикальные градиенты температуры создают неоднородности в атмосфере, которые особенно заметны на длинных линиях нивелирования и могут приводить к систематическим погрешностям при измерении превышений. Атмосферное давление влияет на плотность воздуха в меньшей степени, однако при высокоточных измерениях его учет необходим для корректного расчета поправок. Влажность также изменяет плотность и показатель преломления, вызывая небольшие, но регулярные отклонения луча. Суммарное действие этих факторов определяет кривизну линии визирования, что делает обязательным применение методов компенсации рефракции, особенно при выполнении нивелирования на больших высотах или на длинных участках.

Механизм возникновения ошибок нивелирования из-за рефракции связан с тем, что линия визирования нивелира в атмосфере не остаётся абсолютно прямой. Атмосферный воздух имеет неоднородную плотность, которая изменяется с высотой, температурой, давлением и влажностью. Когда световой или лазерный луч проходит через слои с разной плотностью, он преломляется, то есть слегка изгибается. В результате возникает искажение видимой высоты точки. Суммарное отклонение луча от прямой линии увеличивается на больших дистанциях и для высокоточного нивелирования на высотных зданиях это приводит к погрешностям в миллиметрах или сантиметрах, что негативно отражается на строительных конструкциях. Погрешность имеет постоянный характер, поскольку атмосферная рефракция действует на все точки линии визирования, поэтому обязательно применение корректирующих коэффициентов или современных приборов с автоматической компенсацией. Таким образом, ошибка возникает из-за физического отклонения пути луча в атмосфере, которое необходимо учитывать при проектировании и проведении высокоточного нивелирования, а не из-за дефектов прибора.

Повторные измерения и дальнейшее осреднение результатов являются действенным способом снижения погрешностей, вызванных атмосферной рефракцией и иными непредвиденными обстоятельствами. Суть метода заключается в повторном выполнении измерений на одной и той же линии визирования несколько раз, при этом результаты каждого измерения фиксируются отдельно. Теоретическое обоснование этого подхода заключается в статистическом принципе: при увеличении числа измерений случайные колебания величины превышений, возникающие из-за неравномерности атмосферы, температуры и других условий, усредняются, что позволяет получить более точное и надёжное значение превышения. На практике этот метод используется на строительных площадках высотных зданий, где длинные линии ниве-

лирования подвергаются влиянию различных слоёв воздуха. Измерения выполняются в разное время суток или при изменении погодных условий, что дополнительно повышает достоверность усреднённого результата.

Современные электронные и лазерные нивелиры предоставляют принципиально новый уровень точности за счёт автоматической компенсации влияния атмосферных условий. Такие приборы оснащены встроенными датчиками температуры, давления и влажности, которые в реальном времени корректируют показания, учитывая рефракцию воздуха и другие атмосферные эффекты. Это позволяет получать результаты нивелирования с минимальными систематическими погрешностями, снижая зависимость точности от опыта оператора. Среди преимуществ этих приборов можно выделить высокую скорость измерений, возможность работы на больших высотах и длинных линиях, а также интеграцию с электронными системами обработки данных. Тем не менее, ограничения всё же существуют: точность приборов может снижаться при аномальных погодных условиях, требуется регулярная калибровка, а современные устройства стоят выше, чем традиционные нивелиры. В целом, результат последовательных измерений с применением электронных нивелиров существенно повышают достоверность высокоточного нивелирования на строительных объектах.

Для устранения или предотвращения ошибок необходимо рассматривать не отдельный метод, а комплекс мер, включающий поправочные коэффициенты, неоднократные измерения и современные электронные приборы.

Применение поправочных коэффициентов позволяет компенсировать регулярные погрешности, возникающие из-за преломления луча в атмосфере. Коэффициенты рассчитываются на основе фактических метеорологических условий: давления, температуры и влажности воздуха. При этом учитывается длина измеряемого участка и направление линии визирования. Использование коэффициентов гарантирует управляемую и точную корректировку, снижая влияние рефракции на результаты, однако применимость этого метода носит ограниченный характер, из-за точности исходных данных о состоянии атмосферы. Кроме того, поправочные коэффициенты не устраняют случайные колебания, вызванные быстротечными изменениями температуры или турбулентностью воздуха.

Повторные измерения и дальнейшее осреднение результатов позволяют значительно снизить влияние непредвиденных обстоятельств. В этом методе каждое измерение выполняется не один раз, предпочтительно в любых метеоусловиях или в сложных условиях видимости, и итоговое значение превышения определяется как среднее арифметическое всех серий измерений. Статистически такой подход стабилизирует данные и смягчает влияние непродолжительных колебаний атмосферных параметров, а на практике этот метод требует больше времени и ресурсов, так как возрастает количество измерений, но при длинных линиях нивелирования он значительно увеличивает достоверность данных, особенно в сочетании с поправочными коэффициентами.

Современные электронные и лазерные нивелиры являются самым действенным инструментом для высокоточного нивелирования в условиях воздействия атмосферной рефракции. Эти приборы оборудованы встроенными датчиками температуры, давления и влажности, которые позволяют автоматически калибровать измеренные значения в реальном времени. Данный подход сводит к минимуму воздействие человеческого фактора и поддерживает постоянство точности даже при изменении внешних условий. Одно из главных преимуществ электронных приборов - высокая скорость выполнения измерений, возможность работы на больших высотах и длинных линиях, а также интеграцию с системами автоматической обработки данных. Минусом является высокая стоимость оборудования и регулярная калибровка, а также погрешность измерений в неблагоприятных метеорологических условиях.

Самая надежная стратегия нивелирования на строительной площадке высотного здания состоит в совмещении всех трёх подходов. На коротких линиях и при относительно устойчивых погодных условиях достаточно применения поправочных коэффициентов с незначительным количеством повторных измерений. На ключевых участках, где установка конструкций требует максимальной точности, советуется осуществлять неоднократные измерения с осреднением, одновременно используя электронные нивелиры для автоматической компенсации рефракции. Такой комплексный подход позволяет одновременно сокращать систематические и случайные ошибки, обеспечивая максимальную надёжность и точность результатов.

При планировании работ нужно учитывать время суток и погоду: лучше выполнять измерения, когда атмосферные градиенты наименьшие, а также избегать резких скачков температуры и сильного ветра. Необходимым элементом является контроль за калибровкой приборов и корректный ввод текущих значений температуры, давления и влажности. В целом, только интеграция всех методов и тщательная организация измерений позволяют достичь требуемой точности высокоточного нивелирования в условиях воздействия атмосферной рефракции на строительстве высотных зданий.

Подводя итоги, можно сказать, что даже несущественные изменения плотности воздуха, связанные с колебаниями температуры, давления и влажности, приводят к отклонению линии визирования и накоплению систематических ошибок. Эти ошибки особенно заметны при измерениях на больших высотах и длинных линиях нивелирования, что является критическим фактором для строительства высотных зданий, где точность превышений напрямую влияет на качество установки конструкций и безопасность сооружений. Разобрав изученные методы, можно сделать вывод, что применение поправочных коэффициентов позволяет покрывать предсказуемые постоянные погрешности, неоднократные измерения с усреднением снижают влияние случайных колебаний атмосферных условий, а использование современных электронных и лазерных нивелиров с автоматической компенсацией обеспечивает высокий уровень точности при незначительном влиянии человеческого фактора.

Основная задача предложенных решений заключается в том, что их применение на строительных объектах обеспечивает высокую надёжность и точность нивелирования, позволяет снизить риск накопления ошибок при установке каркасов, инженерных коммуникаций и других элементов высотных зданий, а также улучшить процесс измерений за счёт использования современных приборов и интеграции методов компенсации. Это делает комплексный подход с учётом рефракции особенно важным для инженерной практики и проектирования строительных процессов.

Перспективы последующих исследований связаны с разработкой более точных моделей атмосферной рефракции, которые учитывают локальные и незначительные изменения температурных и влажностных градиентов, а также с интеграцией автоматических систем контроля рефракции непосредственно в программное обеспечение нивелирных приборов. Возможны исследования по оптимизации комбинации методов - корректирующих коэффициентов, неоднократных измерений и электронных нивелиров - для увеличения точности и сокращение сроков выполнения работ на строительных площадках с различными погодными условиями. Также перспективным направлением является использование дистанционного мониторинга атмосферных параметров и их автоматической подстановки в систему коррекции измерений в режиме реального времени.

Для очевидного подтверждения влияния атмосферной рефракции на результаты высокоточного нивелирования рассмотрим практическую ситуацию, создающуюся при возведении 40-этажного жилого комплекса высотой 120 метров. Геодезическая служба выполняет передачу высотной отметки с исходного репера, расположенного на поверхности земли, на монтажный горизонт 30-го этажа. Измерения проводятся в дневное время при ясной погоде с помощью высокоточного оптического нивелира.

В процессе измерений геодезист фиксирует нестабильность отсчетов по рейке: визирный луч «плавает», что особенно заметно при длительных наблюдениях. Причина кроется в нагретых солнцем фасадах здания, от которых поднимаются потоки теплого воздуха. Эти потоки создают локальные зоны с разной плотностью воздуха, через которые проходит луч нивелира. В результате луч искривляется, и наблюдаемая высота точки на рейке оказывается завышенной или заниженной относительно истинного значения.

Для проверки стабильности результата геодезист выполняет серию из трёх измерений одной и той же линии с интервалом в 15 минут. Полученные значения превышения составляют: 12,452 м, 12,447 м и 12,461 м. Размах между крайними значениями достигает 14 мм, что значительно превышает допустимую погрешность для данного этапа строительства, установленную проектом в 3 мм.

Если бы геодезист ограничился одним измерением и принял его за истинное значение, ошибка могла бы составить до 7–10 мм. При последующей передаче этой отметки на вышележащие этажи погрешность накапливалась

бы и на уровне 40-го этажа могла достичь нескольких сантиметров. Такое отклонение привело бы к перекосу плит перекрытия, сложностям при монтаже лифтового оборудования и нарушению вертикальности несущих конструкций.

В данной ситуации правильным решением стало проведение многократных измерений в разное время суток с последующим усреднением результатов. Измерения, выполненные ранним утром, когда температурные градиенты минимальны, показали стабильные значения с расхождением не более 2 мм. Полученное среднее значение было принято в качестве окончательной отметки, что позволило избежать накопления ошибки и обеспечить соответствие конструкций проектным требованиям.

Этот пример наглядно демонстрирует, что игнорирование влияния рефракции даже на одном этапе передачи высоты может привести к серьёзным последствиям для всего здания, в то время как своевременное применение простых методов контроля — многократных измерений и выбора благоприятного времени суток — позволяет свести риски к минимуму.

Список литературы:

1. Основные источники погрешностей геометрического нивелирования. — Текст: электронный // bstudy.net: [сайт]. — URL: https://bstudy.net/821177/estestvoznanie/osnovnye_istochniki_pogreshnostey_geometricheskogo_nivelirovaniya (дата обращения: 26.03.2026).
2. Рефракция света в атмосфере. — Текст: электронный // booksite.ru: [сайт]. — URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/096/752.htm> (дата обращения: 26.03.2026).
3. Астрономическая рефракция. — Текст: электронный // Википедия: [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Астрономическая_рефракция (дата обращения: 26.03.2026).
4. Влияние кривизны земли и рефракции при геометрическом нивелировании. — Текст: электронный // bstudy.net: [сайт]. — URL: https://bstudy.net/1011044/agro/vliyanie_krivizny_zemli_refraktsii_geometrichesk_om_nivelirovaniy (дата обращения: 26.03.2026).
5. Исследование точности тригонометрического нивелирования с применением электронного тахеометра Leica TS16. — Текст: непосредственный // Рецензируемый научный журнал тенденции развития науки и образования. — Июнь 2024 (Часть 18). — № 110. — С. 156-158.
6. Геометрическое нивелирование. — Текст: электронный // Википедия: [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Геометрическое_нивелирование (дата обращения: 26.03.2026).
7. Об определении и учете коэффициента рефракции на строительной площадке / М. Я. Брынь, Ю. В. Лобанова, Д. А. Афонин. — Текст: непосредственный // Вестник СГУГиТ. — 2022. — Т. 27. — № 1. — С. 6-14.
8. Мозжухин, О. А. Рефракция в двустороннем тригонометрическом нивелировании. Определение поправок / О. А. Мозжухин. — Текст: непосредственный // Геодезия и картография. — 2018. — № 4. — С. 8-13.
9. Вердиев, С. Б. Вопросы учета рефракции при осуществлении деформационных измерений методом дифференциального нивелирования / С. Б. Вердиев. — Текст: непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. — 2019. — № № 4 (102). — С. 35-37.
10. Мозжухин, О. А. К анализу путей развития проблемы учёта рефракции в нивелировании / О. А. Мозжухин. — Текст: непосредственный // Геодезия и картография. — 2016. — № 11. — С. 16-19.
11. Изотов, А. А. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования / А. А. Изотов, Л. П. Пеллинен. — Текст: непосредственный // Труды ЦНИИГАиК: — М.: Геодезиздат, 1955. — Вып. 102. — С. 176.
12. Павлов, Н. А. Рефракция в высокоточном и точном нивелировании / Н. А. Павлов. — Текст: непосредственный // Труды ЦНИИГАиК. — : М.: Геодезиздат, 1937. — Вып. 23 — С. 92.