



МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДКОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

Студенты гр. УМАЛ-10-23(iqt)

Ахматов Ботир Жасурович

Абдулхаков Абдурасул Абдумаликович

Ташкентский государственный транспортный
университет (Ташкент, Республика Узбекистан), научный
руководитель Халимова Шахноза Рахмиджановна,
botirakhmedov101@gmail.com

Аннотация: В статье рассматриваются методы определения осадки инженерных сооружений, обусловленные деформацией основания под действием эксплуатационных нагрузок. Особое внимание уделено методам послойного суммирования, эквивалентного слоя и расчёту по методу Егорова. Приведены особенности расчёта осадок при слоистом строении основания, а также крена фундаментов при эксцентричном загрузении. Рассматриваются современные полевые способы мониторинга осадок с использованием нивелирования, осадочных марок, GPS и инклинометрии. Отмечена важность комплексного подхода к оценке осадок с целью обеспечения надёжности и долговечности сооружений.

Ключевые слова: осадка, фундамент, инженерные сооружения, деформация грунта, метод послойного суммирования, метод эквивалентного слоя, метод Егорова, нивелирование, крен, инклинометрия, геодезический мониторинг, консолидация, МКЭ, СНиП.

Annotation: The article discusses methods for determining the settlement of engineering structures caused by deformation of the foundation soil under operational loads. Particular attention is given to the methods of layer-by-layer summation, the equivalent layer method, and Egorov's method. The article highlights the features of settlement calculations for layered soil foundations, as well as foundation tilting under eccentric loading. Modern field methods for settlement monitoring are considered, including leveling, settlement markers, GPS, and

inclinometry. The importance of a comprehensive approach to settlement assessment is emphasized to ensure the reliability and durability of structures.

Keywords: *settlement, foundation, engineering structures, soil deformation, layer-by-layer summation method, equivalent layer method, Egorov's method, leveling, tilt, inclinometry, geodetic monitoring, consolidation, FEM, SNiP*

Осадка инженерных сооружений — это снижение отметки основания вследствие деформации грунтов под нагрузкой. Этот процесс может происходить как постепенно, так и скачкообразно, в зависимости от свойств основания, конструкции сооружения и внешних факторов. Правильное определение осадки имеет ключевое значение для обеспечения надёжности, устойчивости и долговечности зданий и сооружений.

В современных условиях, когда интенсивно развиваются технологии строительства и возводятся сложные по архитектуре и конструкции объекты, особенно важно точно оценивать величину осадки ещё на стадии проектирования. Ошибки в определении осадок могут привести к неравномерной осадке, трещинам, перекосам конструкций, а в крайних случаях — к частичному или полному разрушению сооружений.

Существует множество методов для определения осадок, которые условно делятся на теоретические, лабораторные, полевые и численные. Каждый из них имеет свои особенности, область применения, точность и требования к исходным данным. Задачей данной статьи является систематизация этих методов, анализ их преимуществ и недостатков, а также практических возможностей применения в инженерной геотехнике.

Классификация методов определения осадок инженерных сооружений

Осадки инженерных сооружений являются важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов. Для их определения применяются различные методы, каждый из которых подходит для решения определённой задачи в зависимости

от особенностей грунта, типа сооружения и условий эксплуатации. Методы определения осадок можно классифицировать по различным признакам, таким как принцип работы, источник данных и этап применения.

Теоретические методы основаны на аналитическом расчёте осадок с использованием физических законов механики грунтов и упругости. Они часто применяются на ранних стадиях проектирования для предварительной оценки осадок.

Метод послойного суммирования: Расчёт осадок каждого слоя грунта отдельно с учётом их деформации под нагрузкой.

Метод упругости: Применяется для расчёта осадок с использованием теории упругости для упругих или сжимаемых оснований.

Эти методы позволяют получить общее представление о величине осадок, но их точность зависит от правильности исходных данных и упрощений, сделанных при расчётах.

Лабораторные методы используются для точного определения характеристик грунтов, которые затем применяются для расчёта осадок. Эти методы включают в себя испытания на образцах грунта, отобранных с места будущего строительства.

Испытания на сжимаемость: Измерение изменения объёма образца грунта под действием давления для получения коэффициента сжимаемости.

Испытания на консолидацию: Используются для определения осадок в водонасыщенных грунтах в процессе уплотнения с течением времени.

Прочностные испытания: Исследования, направленные на определение прочности грунта при различных нагрузках.

Лабораторные методы позволяют получить точные данные о свойствах грунта, что делает расчёты осадок более достоверными.

Полевые методы являются наиболее точными и дают данные, полученные непосредственно на месте строительства. Они позволяют

измерить реальные осадки и деформации грунта в процессе эксплуатации сооружения.

Нивелирование: Измерение вертикальных перемещений поверхности в различных точках с помощью нивелира.

Штамповые испытания: Применяются для определения деформаций грунта под воздействием концентрированных нагрузок.

Осадочные марки: Установка специальных марок на фундаменте или грунте для измерения изменений в высоте.

Инклинометрия: Измерение наклона сооружений или грунта с использованием инклинометров, чтобы определить неравномерные осадки.

Полевые методы позволяют получить максимально точные данные о реальных осадках и деформациях оснований в условиях строительства и эксплуатации.

Численные методы используют компьютерное моделирование для расчёта осадок и деформаций на основе физических законов механики грунтов и упругости. Они позволяют учитывать сложные взаимодействия грунтов, нагрузок, геометрии сооружений и других факторов, которые трудно учесть в теоретических расчётах.

Метод конечных элементов (МКЭ): Это метод, в котором объект (грунт и сооружение) разбивается на множество мелких элементов, и для каждого элемента рассчитываются напряжения и деформации. МКЭ позволяет моделировать сложные геометрии и неоднородности.

Моделирование с учётом консолидации и фильтрации: Используется для моделирования осадок водонасыщенных грунтов с учётом процесса консолидации и фильтрации воды. Численные методы позволяют получать высокоточную картину осадок, но требуют наличия точных данных о грунтах и условиях строительства.

Для более точного определения осадок часто используется комбинация различных методов. Например, теоретические расчёты могут быть

использованы для предварительной оценки, а затем проверены и уточнены с помощью лабораторных и полевых исследований. В некоторых случаях численные методы применяются для моделирования на основе полученных данных из лаборатории и поля.

Таким образом, выбор метода определения осадок зависит от множества факторов: стадии проектирования, типа грунта, характеристик сооружения, доступности оборудования и точности требуемых данных. Комплексное использование различных методов позволяет добиться наиболее точных и достоверных результатов, что способствует безопасности и долговечности сооружений.

Как было уже отмечено, что из четырех составляющих частей осадки в данном разделе рассматривается только осадка уплотнения, т. е. осадка, происходящая вследствие деформации грунта под воздействием напряженного состояния, возникающего от нагрузки, передаваемой фундаментом на грунт основания. Развивается эта осадка во времени, как правило, медленно (в течение нескольких лет после возведения здания). Медленное нарастание деформаций грунтов связано с развитием деформаций ползучести пленочной воды, а также с постепенным выдавливанием воды из пор грунта основания при водонасыщенном его состоянии.

Поскольку конструкции здания или сооружения получают наибольшие деформации при полном развитии осадки в конце срока стабилизации ограничивает эти значения осадок, называемые конечными или просто осадками. Последний термин, как более краткий, будет использован в дальнейшем, так как ниже рассматривается расчет только конечных осадок. Таким образом, осадкой фундамента называется полное вертикальное перемещение его вследствие деформации толщи грунта основания, медленно развивающейся во времени. Осадкой слоя грунта называется величина, на которую уменьшается его толщина вследствие деформации грунта этого слоя. Разработано семнадцать методов расчета осадок. Однако в проектной

практике в большинстве случаев пользуются двумя основными методами: методом суммирования и методом эквивалентного слоя. Анализ всех методов расчета занял бы много времени, поэтому остановимся лишь на некоторых из них.

Определение осадки методом суммирования

Рассматриваемый метод расчета основан на следующих допущениях:

1) грунт под фундаментом не имеет бокового расширения; 2) вертикальные деформации слоев грунта прямо пропорциональны напряжениям p_z , убывающим с глубиной; 3) на глубинах, где дополнительное напряжение p_z составляет менее 20% от веса вышележащих слоев грунта (природное давление), считается, что грунт не испытывает деформаций; 4) напряжения p_z определяются под центром загрузки методами теории упругости без учета изменения деформативных характеристик грунта по глубине; 5) безразмерный коэффициент β , зависящий от коэффициента пикового расширения грунта, принимается равным 0,8 для всех видов грунтов и рассматривается как коэффициент, корректирующий упрощенную расчетную схему; 6) жесткость фундаментов и надфундаментных конструкций не учитывается. На основе перечисленных допущений расчет осадки фундамента производится по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n h_i \frac{\beta}{E_i} p_{zi}$$

где n — число слоев, на которые разбита сжимаемая толща основания; h_i — толщина i -го слоя грунтов в см; E_i — модуль общей деформации i -го слоя в кГ/см²; β — безразмерный коэффициент, равный 0,8; p_{zi} — полусумма вертикальных нормальных напряжений в кГ/см², возникающих на верхней и нижней границах i -го слоя грунта от давления, передаваемого фундаментом, вычисляемых по формуле. В случае учета влияния загрузки соседних

фундаментов дополнительно от каждого учитываемого фундамента вертикальные нормальные напряжения рассчитываются по формуле. При определении мощности сжимаемой толщи основания руководствуются условием:

$$p_r \leq 0,2 p_{\sigma z}$$

где p_z — вертикальные напряжения на глубине z , возникающие от загрузки рассматриваемого фундамента и определяемые по формуле. В тех случаях, когда необходимо учесть загрузки соседних фундаментов, p_z вычисляется по формуле; P_{bg} — природное давление, определяемое по формуле. СНиП рекомендует следующий прием оценки необходимости учета загрузки соседних фундаментов.

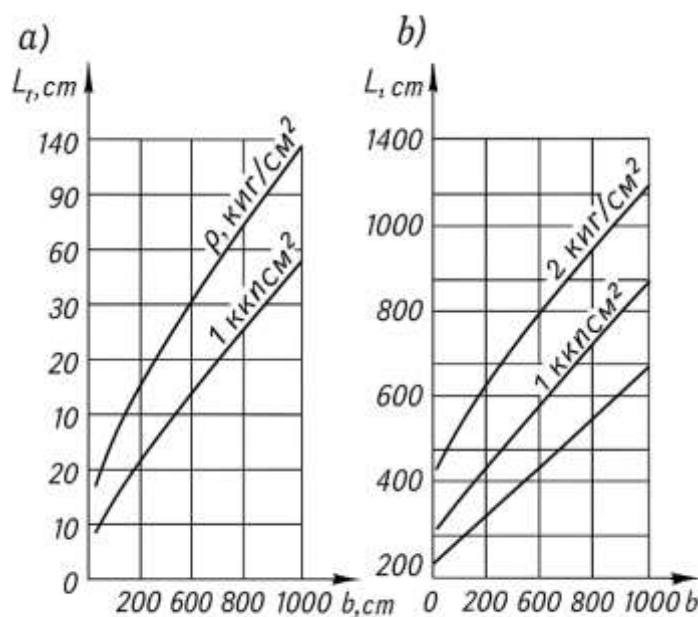
Считается, что осадки отдельных фундаментов следует определять с учетом влияния, нагрузок от соседних фундаментов в тех случаях, когда имеет место условие: $K_r L_{\phi} \leq L_r$, где L_{ϕ} — фактическое расстояние между осями фундаментов в см; L_r — расстояние, получаемое по графикам (см. рис. 1), в см; K_r — коэффициент, определяемый по формуле:

$$K_r = \frac{0,6}{b} - (E - 100) + 1$$

b — ширина подошвы фундамента, необходимость учета влияния которого рассматривается, в см. E — модуль деформации грунта, принимаемый средним в пределах сжимаемой толщи, в кГ/см²; 0,6 — коэффициент, имеющий размерность, в см³/кГ. Величина L_r для прямоугольных фундаментов с промежуточным значением отношения l/b определяется интерполяцией.

Рис. 1. Графики для определения расстояния между осями фундаментов в случае учета влияния загрузки соседнего фундамента а

— для квадратного фундамента; б — для прямоугольного фундамента при $l/b \geq 5$.



Поскольку метод, рекомендованный СНиПом, может быть использован далеко не во всех случаях (например, при наличии двух соседних фундаментов, расположенных на различном расстоянии от рассчитываемого), целесообразно принять простейшую приближенную оценку необходимости учета загрузения соседних фундаментов или поверхности грунта полезной нагрузкой.

В порядке первого приближения следует учитывать все нагрузки, приложенные на расстоянии менее мощности сжимаемой толщи рассчитываемого фундамента. Мощность этой толщи сначала приходится оценивать ориентировочно. В ходе расчета она уточняется в зависимости, от напряжений как от загрузки рассчитываемого фундамента, так и соседних.

Расчет осадки фундамента методом эквивалентного слоя

Метод суммирования, как показывают приведенные выше примеры, громоздок. Кроме того, он не является точным, так как основан на ряде ранее отмеченных допущений. Во многих случаях расчет осадки фундаментов

может быть произведен по более простому методу эквивалентного слоя. Основные допущения рассматриваемого метода при мощном слое однородного грунта: 1) однородный грунт имеет бесконечное распространение и пределах полупространства; 2) деформации в пределах полупространства пропорциональны напряжениям, т. е. полупространства линейно деформируемо; 3) деформации полупространства устанавливаются методами теории упругости. Из теории упругости известно, что осадка поверхности линейно деформируемого полупространства может быть найдена по формуле:

$$S = \frac{\omega b(1 - \mu^2)p_d}{E}$$

где ω — коэффициент осадки, зависящий от формы площади загрузки, жесткости фундамента и места расположения точки, в которой определяется осадка; p_d — интенсивность приложенного давления, деформирующего рассматриваемое полупространство (грунты основания), в кГ/см²; b — ширина площади загрузки в см; E — модуль общей деформации грунта в кГ/см²; μ — коэффициент бокового расширения грунта основания. Эта формула учитывает ограниченное боковое расширение грунтов основания и деформации их под действием всех компонентов напряжений.

Расчет осадок при слоистом напластовании грунтов

Для определения осадки фундамента при слоистом залегании различных грунтов предложено приближенное решение. Рекомендовано эпюры напряжений сложных очертаний заменить на суммарную эквивалентную треугольную эпюру уплотняющих давлений (рис. 2), под действием которой разовьется осадка, равная осадке, определяемой по формуле. Из этого положения находят высоту треугольной эпюры уплотняющих давлений:

$$H = 2h_s.$$

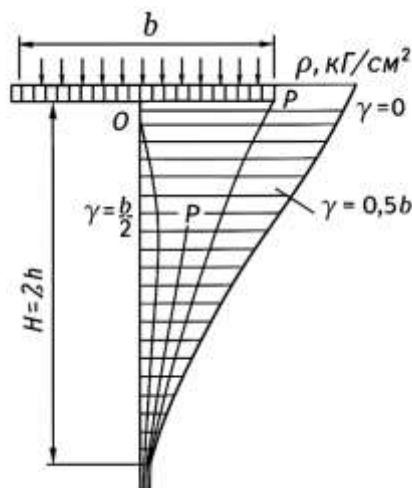
Величина H рассматривается как мощность активной зоны, в пределах которой практически деформируется грунт под действием уплотняющих давлений, распределенных по треугольной эпюре. В таком случае при наличии нескольких слоев грунта в пределах мощности активной зоны рекомендует определять среднее значение коэффициента относительной сжимаемости a_{0m} по формуле:

$$a_{0m} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i a_{0i} z_i}{2h_s^2}$$

Где h_i -толщина i -го слоя грунта в пределах активной зоны, равной $2 h_s$ в см; a_{0i} — коэффициент относительной сжимаемости i -го слоя грунта в см²/кГ; Z_i — расстояние от точки, соответствующей глубине $2 h_s$, до середины i -го слоя в см; h_s — мощность эквивалентного слоя в см; n — число слоев в активной зоне. Формулой можно пользоваться и при непрерывном изменении приведенного коэффициента сжимаемости грунта по глубине отдельного слоя. В этом случае слой надо разбить на части, в пределах которых можно принять значение коэффициента относительной сжимаемости постоянным.

Зная средний коэффициент относительной сжимаемости слоистой толщии грунтов, легко определить осадку фундамента по уже известной формуле: $S = h_s a_{0m} P_d$) В этом случае при определении величины коэффициента эквивалентного слоя по табл. принимают среднее значение коэффициента бокового расширения грунта μ .

Рис.2. Расчетная схема эквивалентной эпюры.



Расчет осадки фундамента по методу Егорова

При расчете осадки фундамента исходят из следующих допущений:

- 1) деформирующаяся толща грунтов ограничена по мощности;
- 2) деформации в пределах каждого слоя пропорциональны напряжениям, т. е. грунт каждого слоя является линейно деформируемым;
- 3) деформации отдельных слоев устанавливаются с учетом всех составляющих напряжений;
- 4) осадка фундамента равна средней величине осадки поверхности грунта под действием равномерно распределенной нагрузки;
- 5) жесткость фундамента не учитывается;
- 6) распределение напряжений в слое грунта принимается в соответствии с задачей однородного полупространства, а жесткость подстилающего слоя учитывается поправочным коэффициентом М.

Выведена формула для конечной осадки:

$$S = \left[b p_d \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_i} \right] M$$

Где b — ширина фундамента; p_d — среднее давление, под действием которого уплотняется грунт основания; E_i — модуль деформации i -го слоя грунта; K_i — коэффициент, зависящий от формы подошвы и отношения H/b , определяемый по табл. М — коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений при наличии жесткого подстилающего слоя (принимается по табл.). Коэффициент М одновременно учитывает отсутствие перемещений по

контакту сжимаемого слоя грунта и подстилающего недеформируемого массива. Величина M зависит от коэффициента Пуассона $\mu = 0,30$. Мощность активной зоны H , в пределах которой следует учитывать деформации грунтов основания, по этому методу установить нельзя, поэтому при отсутствии подстилающих скальных пород определяет ее в соответствии с методом суммирования. Кроме того, этот метод пока не позволяет определять осадку фундамента с учетом влияния загрузки соседних площадей и фундаментов. Однако весьма ценно, что по этому методу определяются деформации не под действием одного компонента напряжений, а с учетом напряженного состояния в пределах каждого рассматриваемого линейно деформируемого слоя.

Полевые методы измерения осадок: Полевые методы являются наиболее достоверным способом определения осадок инженерных сооружений, так как позволяют фиксировать реальные перемещения конструкции или основания под действием эксплуатационных нагрузок. Они особенно важны на стадии строительства и эксплуатации, а также при наблюдении за деформацией существующих объектов.

Классический способ измерения вертикальных перемещений с помощью нивелира и реек. Производится установка осадочных марок на фундамент или стены сооружения, относительно которых с определённой периодичностью выполняются измерения.

Современные приборы позволяют получить более высокую точность и автоматизацию измерений, особенно на больших площадях или в труднодоступных зонах.

Спутниковые методы (GPS и ГНСС) Используются для длительных наблюдений за осадками в масштабе больших территорий или при деформациях земляного полотна, мостов, плотин.

Использование инклинометров и глубинных датчиков
Инклинометры — приборы, измеряющие отклонение вертикали,

позволяющие определить наклоны конструкции, перекосы и крены, что часто связано с неравномерной осадкой.

Устанавливаются в скважины и позволяют измерять изменения давления поровой воды и осадки грунта на глубине. Применяются в основном в крупных проектах: плотинах, туннелях, высоких насыпях.

Метод обратной геодезии

Применяется для контроля за изменением положения объекта во времени путём сравнения координат точек при различных съёмках. Особенно эффективен при мониторинге мостов, высотных зданий, подпорных стен.

Полевые методы незаменимы при контроле за фактическими осадками сооружений. Они позволяют вовремя выявить опасные деформации, предотвратить аварии и скорректировать строительные или эксплуатационные решения. Особенно эффективны в сочетании с геотехническим мониторингом и цифровыми системами наблюдения.

Список литературы:

1. Казакова, Л. Н. *Основания и фундаменты: учебник*. — М.: АСВ, 2014. — 384 с.
2. Осипов, В. И. *Механика грунтов, основания и фундаменты*. — М.: Высшая школа, 2016. — 510 с.
3. Гольдштейн, М. Г. *Расчет оснований и фундаментов*. — М.: Стройиздат, 1987. — 280 с.
4. СНИП 2.02.01-83* «Основания зданий и сооружений». — М.: Госстрой СССР, 1985.
5. Берг, К. Е., Киселев, В. П. *Геотехника: основы проектирования фундаментов*. — СПб.: Лань, 2020. — 496 с.
6. Садовский, М. А. *Основы теории деформаций грунтов*. — М.: Наука, 1979.
7. Жучков, А. А., Малышев, В. И. *Инженерная геодезия*. — М.: Академия, 2020.

8. Никулин, И. А. *Современные методы геотехнического мониторинга.* — М.: Геоиздат, 2018.
9. Дьяков, Н. Н. *Расчет осадок фундаментов с использованием численных методов.* — М.: АСВ, 2017.