

СССР — МПС — ГУУЗ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ Ж.-Д. ТРАНСПОРТА

---

Аспирант И. З. ЛОБАНОВ

# УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОНЕЧНЫХ ОСАДОК ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
доктор технических наук,  
профессор М. Н. ГОЛЬДШТЕЙН

---

ДНЕПРОПЕТРОВСК,  
1957 г.

НТБ  
ДНУЖТ

СССР—МПС—ГУУЗ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
Ж.-Д. ТРАНСПОРТА

1990

Аспирант И. З. ЛОБАНОВ

# УТОЧНЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОНЕЧНЫХ ОСАДОК ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель—  
доктор технических наук,  
профессор М. Н. ГОЛЬДШТЕЙН



ДНЕПРОПЕТРОВСК  
1957

НТБ  
ДНУЖТ

*Работа выполнена на кафедре  
„Основания и фундаменты“ и в  
научно-исследовательском секторе  
геотехники (НИГСе) Днепро-  
петровского института инжене-  
ров ж.-д. транспорта  
им. Л. М. Кагановича  
в 1953–1956 гг.*

НТБ  
ДНУЖТ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Принятый в новых строительных нормах и правилах метод расчета оснований по предельным состояниям делает задачу расчета осадок вообще и, в частности, задачу определения конечных осадок сооружений особенно актуальной. В связи с этим, перед методикой расчета конечных осадок сооружений встает ряд новых повышенных требований, главные из которых следующие:

1. Увеличение точности расчетов.

2. Необходимость определения возможных перекосов и наклонов сооружений и их секций.

Для уточнения расчетов осадок необходимо прежде всего сделать анализ возможных причин ошибок в существующей методике и по возможности исключить влияние этих причин или учесть их. Для этого необходимо проверить правильность теоретических предпосылок и основных расчетных формул, положенных в основу современной методики расчета, проверить точность учета различных факторов, влияющих на величину осадки сооружения, уточнить методику определения характеристик сжимаемости грунтов, а также проверить правильность учета поведения грунтов под действием нагрузок от сооружения.

Анализируя в этом аспекте существующую методику расчета конечных осадок, можно видеть, что основными причинами ее неточности могут быть следующие три группы ошибок:

1. Ошибки, связанные с применением положений и формул линейной теории упругости к грунтам, как к телам неупругим, неизотропным и неоднородным. Из всех причин этой группы наибольшее значение имеет влияние неодинаковой сжимаемости грунтов основания, т.е. влияние их неоднородности.

2. Недостаточная полнота учета всех силовых факторов, влияющих на осадку, а также неточность учета контактных напряжений в расчетах.

3. Ошибки в определении характеристик сжимаемости грунтов.

Как правило, ссылаются на третью группу причин, считая, что влияние первых двух относительно невелико.

Сомнение в отношении правильности положенных в основу теории расчета осадок формул теории упругости (в частности, формул Буссинеска) возникло в связи с тем, что измеренные напряжения под опытными штампами не совпадают с расчетными. Кроме того, на практике замечены качественные отличия в некоторых зависимостях, выведенных на основе теории упругости и примененных к грунтам. Например, было замечено, что в действительности не существует пропорциональности между осадкой и корнем квадратным из площади загрузки. Кроме того, влияние нагрузки на осадку поверхности с удалением от нее затухает значительно быстрее, чем это следует из уравнения Буссинеска. И, наконец, было замечено, что наблюдаемые осадки, как правило, меньше расчетных.

Эти обстоятельства привели к тому, что из всех причин первой группы наиболее полно было изучено влияние неоднородной сжимаемости основания на его напряженное и деформированное состояние.

Согласно работам Н. Н. Иванова, О. К. Фрелиха, И. Одэ, К. Грубана и Г. К. Клейна неоднородность грунтового основания, вызванная различным его уплотнением от собственного веса, должна приводить к явлению так называемой концентрации напряжений. И. Одэ, К. Грубан и Г. К. Клейн сделали попытку различными способами определить величину неоднородности основания—так называемый показатель неоднородности полупространства—и получили по этому вопросу различные данные: по Одэ и Грубану этот показатель должен находиться в интервале между единицей и нулем и в среднем равен 0,50, по Клейну он может быть больше единицы.

На влияние второй группы причин, как правило, не обращалось должного внимания. Поэтому существующие методы расчета осадок в этом отношении весьма несовершенны, так как они рассчитаны на определение средних осадок для наиболее простых сооружений в плане (круглых, квадратных или прямоугольных), находящихся под действием равномерной нагрузки—без учета их гибкости, глубины заложения, боковых пригрузок и т. п.

Для наиболее точного и полного учета действующих нагрузок, передаваемых на основание сооружением, необходим такой способ расчета, который позволил бы определить осадку любой точки сооружения от любой системы приложенных к основанию нагрузок, т. е. который решал бы эту задачу наиболее общем случае.

Точность определения характеристик сжимаемости грунтов—коэффициента бокового расширения и модуля сжимае-

мости—может быть определена лишь путем сравнения расчетных осадок с наблюдаемыми на примере реального инженерного сооружения. Это может быть сделано после того, как будет произведен анализ влияния всех возможных причин ошибок первой и второй группы и по результатам этого анализа уточнена методика расчета.

В соответствии с поставленными задачами вся диссертационная работа посвящена анализу возможных причин неточности современной методики расчета конечных осадок и попытке ее уточнения.

Работа выполнена в следующем плане:

1. Исследование влияния неоднородности в отношении сжимаемости реального грунтового основания на точность расчета осадок по формулам Буссинеска.

2. Уточнение методики учета внешних силовых факторов, влияющих на осадку сооружения.

3. Анализ осадок реальных инженерных сооружений целью проверки точности определения характеристик сжимаемости грунтов.

Изучая существующие методы определения характеристик сжимаемости, автор пришел к выводу, что метод штампов не может дать сколько-нибудь обоснованных и правильных параметров для расчета осадок; поэтому в диссертации рассматриваются лишь данные компрессионных испытаний.

4. Разработка методики расчета конечных осадок сооружений.

В качестве реальных объектов для анализа осадок изучены сооружения Каховского гидроузла—главным образом бетонная водосливная плотина. При проектировании и строительстве этого комплекса сооружений автором под руководством проф. М. Н. Гольдштейна были выполнены многие работы, связанные с осадками: он принимал участие в определении геотехнических характеристик основания, сделал прогнозы осадок, участвовал в наблюдении за ними в процессе строительства и произвел теоретический анализ данных этих наблюдений.

По содержанию вся работа делится на две части.

**Первая часть** состоит из трех глав: глава I—Состояние теории расчета конечных осадок сооружений и задачи диссертации; глава II—Сжимаемость песков; глава III—Некоторые вопросы расчета осадок. Эта часть посвящена вопросам анализа возможных причин ошибок в расчетах. В ней сделана попытка уточнения методики расчета конечных осадок.

Во вторую часть входят: глава IV—Анализ осадок основных сооружений Каховского гидроузла и глава V—Заключение. В этой части сделана проверка правильности теоретических выводов и положений первых трех глав на практике. На основании этой проверки делаются окончательные выводы.

## II. ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ОСАДОК

В основу анализа влияния неоднородности на точность расчета осадок положены работы Фрелиха, Одэ, Грубана и Клейна, посвященные вопросам, связанным с напряженным и деформированным состоянием неоднородного сыпучего полупространства. Имея в виду разноречивость данных относительно показателя неоднородности реального грунтового полупространства, предварительно были рассмотрены результаты многочисленных испытаний песков на компрессию (в том числе по опытам К. Терцаги), а также проведены дополнительные опыты. На основании этой работы (опубликованной в сборнике «Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения», т. I, изд. АН СССР, отд. геолого-географических наук), можно сделать следующие выводы:

1. Уравнение К. Терцаги не точно описывает компрессию песчаных грунтов: между относительной деформацией образца (или коэффициентом пористости) и приложенной к нему нагрузкой существует не лагорифмическая, а степенная зависимость. В диссертации дано новое уравнение компрессии песка.

2. Показатель степени в этом уравнении в основном зависит от минералогического и гранулометрического состава и не зависит от плотности его сложения. Опыты показывают, что он всегда больше нуля и меньше единицы (изменяется от 0,40 до 0,7—0,8) и в среднем равен 0,50.

3. Используя аналогию между компрессией грунта и его бытовым напряженным состоянием, с помощью нового уравнения компрессии можно получить зависимость модуля сжимаемости однородного по составу песчаного основания от глубины. Эта зависимость также носит степенной характер, причем, показатель степени—показатель неоднородности полупространства—всегда больше нуля и меньше единицы, что совпадает с данными Одэ и Грубана. Он зависит от минералогического и гранулометрического состава, сравнительно мало зависит от влажности и не зависит от плотности сложения песчаного грунта.

Пользуясь уравнениями Фрелиха, Одэ, Грубана и Клейна и зная степень неоднородности реального грунтового полупространства, можно теперь сравнить между собою расчетные величины осадок от сосредоточенной силы, действующей на границе этого полупространства, при различных предположениях, положенных в основу их определения, а именно:

а) для однородного по сжимаемости сыпучего полупространства (показатель неоднородности равен нулю);

б) для реального сыпучего полупространства с показателем неоднородности 0,50 (среднее значение для грунтов);

в) для однородного связного полупространства—по формулам Буссинеска, положенным в основу существующих способов расчета.

Такое сравнение показывает, что разница в результатах расчета осадок с определением напряжений по формулам Буссинеска и с учетом неоднородности полупространства очень невелика — не более 8—10%. В действительности эта разница еще меньше, так как в основу теории Фрелиха-Клейна положена модель невесомого сыпучего полупространства, которое не способно воспринимать растягивающие напряжения от внешних нагрузок. Детальное рассмотрение этого вопроса показывает, что если учесть собственное—бытовое—напряженное состояние грунта, то правильное в данном случае было бы применить модель связного неоднородного по сжимаемости полупространства, и тогда влияние неоднородности на точность расчета осадок с определением напряжений по формулам Буссинеска значительно уменьшается.

Таким образом, можно утверждать, что при существующей неоднородности грунтового основания формулы Буссинеска для определения напряжений в применении к расчетам осадок дают достаточную точность. Неоднородность же должна учитываться лишь при определении деформаций грунтов по этим формулам в виде переменного значения модуля сжимаемости,—даже для однородного по составу основания. На основании этого разработана методика определения осадок штампов и фундаментов с учетом неоднородности сыпучего полупространства и приведены соответствующие формулы и графики.

### **III. МЕТОДИКА НАИБОЛЕЕ ПОЛНОГО УЧЕТА СИЛОВОГО ФАКТОРА ПРИ РАСЧЕТАХ ОСАДОК**

Анализ существующих способов расчета осадок (способа ВИОСа, метода эквивалентного слоя проф. Н. А. Цытовича, метода К. Е. Егорова, немецкой методики и др.) показывает



что учет силового фактора в них делается недостаточно полно и точно. В этом отношении они в большинстве своем относятся к частным задачам расчета конечных осадок и в применении к реальным—особенно сложным—инженерным сооружениям являются очень приближенными.

Основными недостатками этих способов являются:

1. Невозможность определения осадки любой точки сооружения.

2. Невозможность расчета осадки при любых нагрузках в плане и любом изменении их интенсивности, а также невозможности учета нагрузок от соседних сооружений.

3. Невозможность определения осадки при любом распределении контактных напряжений,—т. е. невозможность учета взаимодействия основания и фундамента в общем случае—с учетом любой жесткости сооружения, глубины заложения фундамента, характера и величины боковых пригрузок.

В этом отношении существующие способы расчета осадок значительно отстали от достижений современной теории упругости и механики грунтов. Наиболее совершенной является методика В. А. Флорина, но ее применение ограничено условиями плоской задачи.

Чтобы избежать указанных недостатков, необходимо разработать такую методику расчета осадок, при которой можно было бы определить осадку любой точки сооружения от любой системы приложенных к основанию нагрузок. А это возможно сделать лишь тогда, когда интегрирование будет заменено суммированием.

В диссертации приведены два способа расчета осадок, основанных на суммировании действия системы одинаковых сосредоточенных сил, эквивалентной данной системе нагрузок на основание:

1. Способ расчета осадок с учетом суммы горизонтальных напряжений (опубликовано в журнале «Гидротехническое строительство» № 8, за 1956 г.).

2. Способ расчета осадок методом перемещений, опубликованной в сборнике трудов ДИИТа «Вопросы геотехники», изд. 1956 г. Этот способ позволяет определить деформации грунтов основания, не определяя их напряженного состояния.

Преимущества этих способов расчета осадок, особенно последнего, выявились на практике при расчетах и анализе сооружений Каховской ГЭС.

В обоих этих способах величина коэффициента бокового расширения грунта принята постоянной и равной 0,30. Это было сделано после того, как был рассмотрен вопрос о влия-

нии ошибки в определении коэффициента бокового расширения на точность расчета осадок.

Такой анализ показал, что если принять в расчетах коэффициент бокового расширения равным 0,30, то при изменении его в действительности от 0,20 до 0,40 наибольшая ошибка будет колебаться от  $-5,2\%$  до  $+8,3\%$ . Для возможности введения корректировки в расчеты приведен график поправочных коэффициентов.

Расчет осадок методом перемещений сводится к следующему:

а) как для основного, так и для всех соседних сооружений определяются эпюры контактных напряжений; при этом учитываются жесткость этих сооружений, глубина заложения фундаментов и боковые пригрузки;

б) эта система эпюр контактных напряжений заменяется эквивалентной ей системой одинаковых сосредоточенных сил;

в) суммированием определяется относительная деформация в любой точке основания от полученной системы сил; для этого разработана методика расчета и составлена таблица расчетных коэффициентов;

г) по величине относительной деформации в середине расчетного слоя определяется его деформация сжатия; суммируя деформации сжатия всех расчетных слоев сжимаемой толщи, находят полную осадку данной точки сооружения.

Этот способ не имеет недостатков существующих способов расчета конечных осадок, связанных с точностью учета силового фактора. Он очень удобен для анализа наблюдаемых осадок сооружений, так как позволяет наиболее точно учесть условия загрузки основания. Кроме того, зная для каждого определенного случая загрузки наблюдаемую осадку и, сделав предварительный расчет этой осадки методом перемещений, можно для нескольких случаев загрузки составить систему уравнений, в которых неизвестными будут лишь модули сжимаемости грунтов основания и, таким образом, определить зависимость модуля сжимаемости данных грунтов основания от различных факторов. Это и было сделано при анализе осадок сооружений Каховской ГЭС.

#### **IV. АНАЛИЗ ОСАДОК ОСНОВНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАХОВСКОГО ГИДРОУЗЛА**

Научно-исследовательским сектором геотехники Днепропетровского института инженеров ж.-д. транспорта по заданию украинского отделения Гидроэнергопроекта — «Укргидэп'а» — и управления Днепростроя были проведены наблю-

дения за осадками строящихся сооружений Каховского гидроузла: бетонной водосливной плотины, здания ГЭС, шлюза и судоходных устройств, земляных сооружений и пирсов и др. Эти наблюдения проводились с самого начала строительства и в настоящее время еще продолжаютсЯ дирекцией Каховской ГЭС. Они дали большой практический и теоретический материал по некоторым вопросам расчета осадок.

Основанием большинства сооружений Каховского гидроузла служит мощная толща довольно однородных по составу мелко- и среднезернистых кварцевых песков, перерезаемая на глубине 40—50 м от подошвы фундамента 10—12-метровым слоем песчаных нижнесарматских глин. В некоторых местах в эту толщу вклинивается тонкий слой выветрелого известняка.

В этих условиях для анализа в основном приняты результаты наблюдений за осадками средних секций водосливной плотины в первый период строительства — при нагрузках до  $2\text{--}2,5 \text{ кг/см}^2$ ,—когда деформация глинистого слоя еще не началась, и вся основная осадка происходит за счет сжатия однородной верхней толщи песков.

По результатам этих наблюдений можно сделать следующие выводы:

1. Для однородного по составу основания осадки не пропорциональны корню квадратному из площади загрузки.
2. Для одних и тех же условий загрузки осадки не пропорциональны интенсивности нагрузки.
3. На осадку различных точек сооружения влияет история предварительной загрузки основания, а также—порядок приложения нагрузок. Так, точки верхнего бьефа дали большую осадку, чем точки нижнего бьефа, где основание уже было предварительно загружено весом соседних сооружений.

Представление о модуле сжимаемости, как о величине неизменяемой в процессе осадки, не может объяснить этих явлений. Анализ показывает, что для этого нужно учесть увеличение его в процессе сжатия грунтов под сооружением «упрочнение» грунтов—в зависимости от их напряженного состояния. При учете этого фактора расчетные зависимости осадок от площади загрузки и от интенсивности нагрузки совпадают с наблюдениями. В этом случае становится также возможным учесть расчетом влияние истории загрузки основания (порядка производства работ) на величину осадки сооружения.

На основе нового уравнения компрессии в диссертации приведена методика определения модуля сжимаемости песчаного грунта с учетом увеличения его в процессе осадки соо-

ружения. Приведена также и методика учета этого фактора для любых грунтов — при любом характере компрессионной кривой.

Сравнение расчетных осадок, определенных по методике автора, с наблюдаемыми для различных условий и схем загрузки основания показывает довольно хорошую их сходимость (средняя ошибка составляет  $\pm 18\%$ )

4. Наблюдения за осадками показали также, что земляные сооружения или различного рода подсыпки под фундаменты, сделанные из сухих или недостаточно увлажненных грунтов, а также сухие отложения грунтов, которые за всю свою историю еще не находились во влажной среде, способны при насыщении их водою под нагрузкой давать значительные по величине и быстрые по скорости осадки, даже при большой их плотности (при степени плотности 0,7—0,8).

Следовательно, явления быстрой внезапной осадки при увлажнении основания могут иметь место не только в том случае, если оно сложено макропористыми грунтами.

## **V. ВЫВОДЫ**

1. Основными причинами недостаточной точности современных способов расчета осадок являются неполный учет всех нагрузок от сооружений и условий передачи их на основание, а также ошибки в определении характеристик сжимаемости грунтов.

2. Исследования показывают, что формулы теории упругости (в частности формулы Буссинеска) могут быть положены в основу расчета осадок без ущерба для точности последних и в случае неоднородного основания.

3. Для всех расчетов осадок можно принять постоянное значение коэффициента бокового расширения грунта, равное 0,30.

4. При этих условиях рекомендуется новый способ расчета конечных осадок сооружений, основанный на применении метода перемещений теории упругости. Этот способ оправдал себя при расчетах осадок сооружений Каховского гидроузла и анализах данных наблюдений в процессе их строительства.

5. Исследования показывают, что на первой стадии работы основания (по Герсванову — «стадии уплотнения») существует нелинейная зависимость между деформациями и на-

пряжениями, что в этой стадии происходит некоторое постепенное «упрочнение» грунтов.

Это обстоятельство особенно хорошо выражено в случае больших инженерных сооружений, с большой глубиной заложения их фундаментов или при значительных боковых пригрузках, т. е. в тех случаях, когда зоны пластических деформаций грунтов оснований незначительны. При этом оказывается, что модуль сжимаемости грунтов зависит от полного напряженного состояния, вызванного как собственным весом, так и нагрузкой от сооружения.

Зависимость модуля сжимаемости грунта от напряжений, возникающих от действия сооружения, должна учитываться в расчетах осадок. Игнорирование этого фактора является одной из причин неточности современных методов расчета.

На основе анализа компрессионных испытаний в диссертации дается уравнение, описывающее эту зависимость, и методика учета фактора упрочнения грунтов в расчетах осадок.

6. На основании этого предлагается методика расчета конечных осадок инженерных сооружений, которая кратко сводится к следующему:

а) методом перемещений определяются осадки от системы одинаковых сосредоточенных сил, заменяющих действие всех сооружений на основание;

б) модули сжимаемости грунтов определяются на основании компрессионных испытаний грунтов — с учетом их «упрочнения» в процессе предыдущей и настоящей истории загрузки основания.

7 Сравнение наблюдаемых осадок с расчетными для сооружений Каховской ГЭС, показывает, что ошибка в расчетах осадок по такой методике не превосходит 18%.

**Материалы диссертации опубликованы в следующих работах автора:**

1 Новые данные о сжимаемости песков. Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Изд. АН СССР, Москва, 1956.

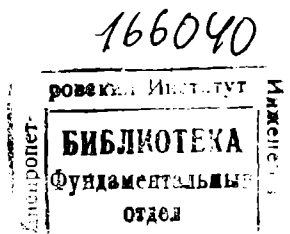
2. Дополнительные данные о компрессии песков. Научн. сообщ. № 2, Днепропетровский институт инж. ж.-д. транспорта. Днепропетровск, 1957

3. Учет горизонтальных напряжений при расчетах осадок «Гидротехническое строительство» № 8 за 1956 г., Госэнергоиздат, Москва.

4. Расчет осадок сооружений методом перемещений. Сборник «Вопросы геотехники», Днепропетровского института инженеров ж.-д. транспорта, Трансжелдориздат, Москва, 1956.

5. Анализ причин расхождения расчетных осадок с наблюдаемыми на примере Каховской ГЭС. Научно-технич. конференция молодых ученых Украины. Тезисы докладов. Издат АН УССР, Киев, 1957

В этих работах приведены основные расчетные формулы, графики и цифровые данные, иллюстрирующие основные положения диссертации.



Подписано к печати 13-V—1957 г. Бумага 60х92 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печатных листов 1  
БТ 05993. Выпуск 14-V—1957 г. Тип. зн. в п. л. 4.800. Зак. № 3325—120  
Днепропетровск. Типогр. отд. Трансжелдориздата.