

**М.И. Фролов**

**Системный анализ  
напряженного состояния  
гидротехнических  
сооружений**

**Москва  
Издательство Нобель Пресс**

УДК 62-63  
ББК 30.6  
М11

**М.И. Фролов**  
М11 Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений / М.И. Фролов – М.: Leppex Corp, — Подготовка макета: Издательство Нобель Пресс, 2013. – 394 с.

**ISBN 978-5-458-54172-5**

Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений позволяет разрабатывать научно-обоснованные практические рекомендации, которые затем используются при разработке нормативных документов по инженерному расчету таких сооружений. Материал книги «Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений» подобрал в себя 30-летние исследования научной школы д.т.н., проф. Фролова М.И., проводившиеся в Московском университете природобустройства и Институте Содружества Независимых Государств. В книгу вошли материалы семи диссертационных работ, а также – более 50 научных статей и двух монографий, написанных Фроловым М.И. и его учениками. Результаты представленных в книге научных исследований были отмечены четырьмя медалями ВВЦ.

**ISBN 978-5-458-54172-5**

© Издательство Нобель Пресс, 2013  
© М.И. Фролов, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Гидротехнические сооружения широко распространены и являются одними из самых сложных, трудоемких и дорогих типов сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения [59, 60].

В качестве водопроводящих или водопропускных сооружений их строят под землей в тех случаях, когда открытая выемка грунтов неэкономична, водовод проходит через густонаселенную или густозастроенную местность, или на ней возможны оползни, осыпи, камнепады [99].

Высокая ответственность конструкций гидротехнических сооружений предъявляет к ним повышенные требования в части достоверности расчетов прочности и безопасности согласно требованиям Федерального закона РФ «О безопасности гидротехнических сооружений» от 7 декабря 2011 года № 417-ФЗ.

Вместе с тем, в настоящее время отсутствует научная литература по системному изучению напряженного состояния гидротехнических сооружений современными методами расчета, получившими широкое распространение при исследовании работы различных конструкций и сооружений.

Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений позволяет разрабатывать научно-обоснованные практические рекомендации, которые затем используются при разработке нормативных документов по инженерному расчету таких сооружений.

Материал книги «Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений» вобрал в себя 30-летние исследования научной школы д.т.н., проф. Фролова М.И., проводившиеся в Московском университете природобустройства и Институте Содружества Независимых Государств

В книгу вошли материалы семи диссертационных работ, а также – более 50 научных статей и двух монографий. Результаты представленных в книге научных исследований отмечены четырьмя медалями ВВЦ.

Первая глава книги написана проф. Фроловым М.И. и посвящена исследованию статических (от веса грунта насыпи) и динамических (сейсмического типа) воздействий на круглые подземные

одинокими и многониточными железобетонными и асбестоцементными трубопроводами аналитическими [205, 214, 215] и численными методами (метод конечных элементов) [15, 50, 64, 89-91, 162, 169, 173, 188, 205, 214, 273, 304]. В этой главе приведены также результаты лабораторных исследований статического давления грунта на трубы [205, 214].

В последующие главы вошли отредактированные и дополненные проф. Фроловым М.И. материалы диссертаций и научных статей его учеников.

В основу второй главы легли исследования к.т.н. Боева Ю.А. [28, 219-223, 237] и к.т.н. Васкеса Рамиреса А.Н. [45, 224-227, 237], посвященные статическому анализу напряженного состояния напорных и безнапорных гидротехнических туннелей без обделки методом граничных элементов в форме фиктивных нагрузок.

Третья глава основана на исследованиях к.т.н. Баутдинова Д.Т. [16-19] и посвящена статическому анализу напряженного состояния безнапорных гидротехнических туннелей без обделки, проложенных в анизотропных (трансверсально-изотропных) скальных грунтах, методом конечных элементов.

В четвертой главе представлены исследования к.т.н. Смирновой Н.Г. Эта глава посвящена статическому анализу напряженного состояния бетонных массивных гидротехнических сооружений вблизи трещин методом граничных элементов в форме разрывных смещений [21, 115, 176].

В пятой главе использованы материалы научных исследований к.т.н. Усачевой А.А., посвященные статическому анализу напряженного состояния бетонных массивных гидротехнических сооружений вблизи раковин и полостей прямым методом граничных элементов в форме граничных интегралов [21, 115, 193].

# **1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ ОДИНОЧНЫЕ И МНОГОНИТОЧНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫЕ ТРУБЫ**

Большинство сооружений на оросительных и осушительных сетях (регуляторы, дюкеры, проезды, водовыпуски, ливнеспуски и др.) – трубчатого типа [23].

В гидротехническом строительстве при сооружении деривационных и турбинных водоводов применяют трубы больших диаметров [59, 60].

Большое распространение получили трубы при сооружении подводящих и напорных трубопроводов мелиоративных насосных станций. Значительное число таких сооружений возводится в районах с повышенной сейсмичностью [53-57, 65, 137, 139, 159].

## **1.1. Исследование статического воздействия на круглые подземные трубы от собственного веса грунта**

В данном разделе приведен обзор аналитических решений, численных и экспериментальных исследований статического воздействия собственного веса грунта на круглые подземные трубы.

Также в этом разделе приводятся подробные сведения о результатах компьютерных (с использованием метода параметрического анализа) и экспериментальных авторских исследований [205, 214], ранее не опубликованных в печати в полном объеме.

Сведения о полученных автором аналитических решениях опубликованы в монографии [215] и работах [202-204, 210, 211, 216].

### **1.1.1. Обзор аналитических решений**

Впервые плоская задача по определению статического давления грунта на трубопровод, уложенный в насыпи или траншее в одну нитку, была поставлена и решена в начале XX века Марстоном А. [108, 110, 261, 296, 297]. Полученное им решение основано на упрощенной теории предельного равновесия сыпучей среды.

Теория Марстона А. утверждает следующее: в состоянии предельного равновесия в засыпке, находящейся выше сооружения, образуются вертикальные плоскости скольжения (вдоль которых

действуют силы трения), касательные к трубе, которые либо доходят до поверхности земли (случай низкой насыпи), либо – до некоторого уровня, расположенного ниже дневной поверхности (случай высокой насыпи). Этот уровень был назван Марстоном А. «уровнем равной осадки».

При этом в случае жесткой трубы, она менее деформируема, чем находящаяся рядом с ней засыпка, поэтому на трубопровод будет передаваться большая нагрузка, чем на засыпку за счет сил трения, действующих по плоскостям скольжения (рис. 1.1а).

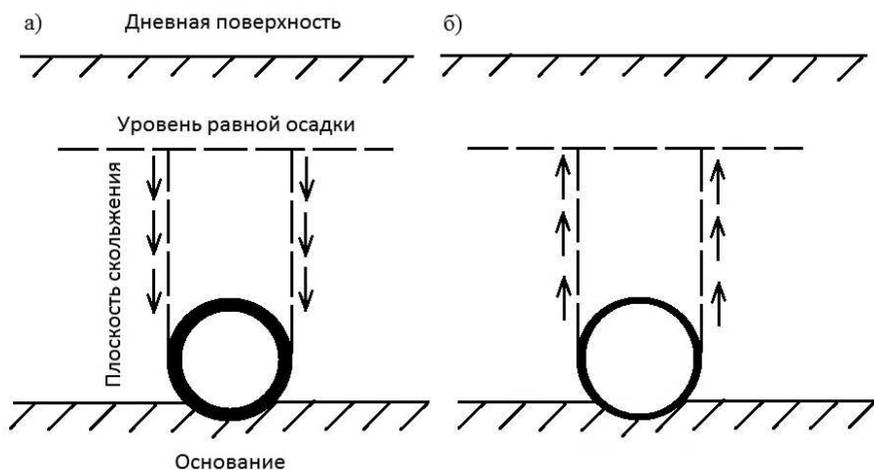


Рис.1.1. Схема Марстона А. для высокой насыпи: а – жесткая труба; б – гибкая труба

Таким образом, над жесткой трубой возникает концентрация давления грунта, определяемая коэффициентом концентрации  $K_H$  [108, 110], равным отношению максимального давления грунта на трубу к нагрузке от веса столба грунта над трубой  $p = \gamma H$ , где  $\gamma$  – удельный вес грунта насыпи,  $H$  – высота насыпи над трубой. При этом  $K_H$  принимает значения от 1,0 до 2,0.

В случае с гибкой трубой Марстон А. предложил обратную картину и  $K_H < 1$ .

Согласно исследованиям Леонгардта Г. [294], трубы делятся на жесткие, полужесткие и гибкие в зависимости от соотношений толщины стенки ( $h$ ) к диаметру ( $D$ ), модулей деформаций трубы и грунта.

Для наиболее распространенных условий укладки, а также при типовом проектировании был получен первый критерий для жестких труб [205]:  $h \geq 0,09D_B$ , где  $D_B$  – внутренний диаметр трубы. Таким образом, к категории жестких относятся железобетонные безнапорные и низконапорные трубы с ненапрягаемой арматурой [23, 48].

У теории Марстона А. было много последователей: Шпенглер М.Г. [306], Кларк Н.В. [272], Марквардт Е. [295], Зехи К. [307], Геррен А. [281], Лазард Р. [293] и др.

В отличие от Марстона А., Фельми А. [310] предложил не вертикальные, а – наклонные плоскости скольжения под углом внутреннего трения в сторону, противоположную от местоположения трубы.

Ярошенко В.А. [261] предложил принять закон изменения сил трения по плоскостям, пропорциональным весу насыпи над трубопроводом. А Клейн Г.К. [110] считал, что боковое давление и силы трения по плоскостям скольжения возрастают с глубиной по экспоненциальному закону.

В работе Попова А.Н. [150] упоминаются криволинейные плоскости скольжения, что подтверждается исследованиями Йошикоши В. [312], который считал, что форма линий скольжения зависит от высоты насыпи.

Проведенный нами анализ перечисленных исследований показал, что уровень равной осадки расположен на расстоянии  $H = (2,5 - 3,0)D$  от верха трубы, где  $D$  – ее наружный диаметр.

По данным Виноградова Н.М. [108] теория Марстона А. дает завышенные значения вертикального давления грунта на трубопровод по сравнению с результатами экспериментов.

Впервые задачу о давлении грунта на трубопровод, уложенный в две нитки, рассмотрел Емельянов Л.М. [84]. Анализ этого решения позволяет сделать вывод о том, что давление грунта насыпи в замке жестких труб двухниточной укладки меньше, чем в замке одиночно уложенной трубы. Этот факт подтверждается широко-

масштабными исследованиями многониточных труб [205, 207, 210, 211, 214, 216].

В своей статье [109] Клейн Г.К. указывал: «Для определения давления грунта на практике в основном применяется решение теории предельного равновесия, к которому механически добавляется условия совместности деформаций трубопровода, окружающей его засыпки и основания. Избежать этого противоречия можно только с переходом от решений по теории предельного равновесия к решениям по теории упругости...». Того же мнения придерживаются Кеннеди Г. [290], Фролов М.И. [25, 205, 210] и ряд других исследователей.

Впервые теорию линейной изотропной упругости [4, 6, 73, 106, 122, 142, 190, 215] к расчету одиночной трубы в насыпи применил Малышев М.В. [124, 125], который воспользовался аналитическим решением для плоской задачи о совместной работе упругого кольца с бесконечной весомой средой.

Другая формула была получена Клейном Г.К. [111], который для определения напряженного состояния (НС) вблизи поверхности трубы исходил из решения Савина Г.Н. [167] для задачи о растянутой в одном направлении линейно упругой изотропной бесконечной среды, в которую впаяна (без проскальзывания) упругая шайба. Для перехода от сплошной шайбы к трубе в условиях плоской деформации, Клейн Г.К. исходил из условия равенства укорочения их вертикальных диаметров.

Орловым С.А. [145] получено решение задачи о давлении плоской весомой линейно упругой изотропной бесконечной среды на цилиндрическую трубу. Для этого вначале он решил задачу о НС весомой среды, ослабленной отверстием, используя функцию напряжений [190], а усилия в трубе нашел методом сил. Такое решение позволяет рассчитывать трубы, содержащие в поперечном сечении шарниры.

Хег К. [283] поставил и решил в полярных координатах задачу линейной теории упругости о сжатии в двух направлениях плоскодеформированной невесомой бесконечной среды, в которую либо впаяна (без проскальзывания), либо вставлено с проскальзыванием упругое кольцо. Для решения этой задачи он использовал функцию напряжений, предложенную Митчелом Д.Х. [299].

Та же задача была решена в перемещениях методом разделения переменных Фроловым М.И. [215], что позволило свести двумерную краевую задачу к одномерной для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, имеющей точное аналитическое решение. Для решения задачи линейной теории упругости для изотропного тела такой метод был применен впервые.

Аналогичную решенной Хегом К. задачу рассмотрел Бернс Д.К. и Ричардс Р.М. [271], решением которой воспользовались Кэй Д.Н., Ост М.И. и Крижек Р.Д. [289], применив к расчету труб.

Заметим, что решения теории линейной упругости для изотропного тела применяют и для расчета обделок туннелей. Сюда следует отнести работу Бялера И.Я. [41], рассмотревшего задачу о давлении плоскодеформированной ограниченной сверху весомой среды на упругое кольцо в биполярных координатах, в отличие от предыдущих авторов, получавших решения в полярных координатах.

Случаи проскальзывания и впаивности кольца в весомой линейно упругой изотропной бесконечной среде рассмотрел Хартман Ф. [283].

Для расчета обделок туннелей применялось также решение о двухстороннем сжатии бесконечной невесомой изотропной линейно упругой плоскодеформированной среды, в которую впаивано упругое кольцо. Такая задача решалась Федоровым В.Л. [195] и Бялером И.Я. [42].

Померанец В.Н. [149] отмечает, что модель с невесомой бесконечной средой применима для труб, расположенных на глубине более  $3,0D$  (случай высокой насыпи), а с весомой – менее  $3,0D$  (случай низкой насыпи).

Как видим, этот частный результат, полученный с помощью теории упругости, является одним из основных постулатов теории Марстона А.

Проведенный нами анализ аналитического решения для первой упругой модели показал, если нагрузка приложена ниже уровня  $H = (2,5 - 3,0)D$  над замком трубы, то коэффициент концентрации статического давления грунта увеличивается с увеличением  $H$ , достигая максимального значения при  $H = (2,5 - 3,0)D$ . При даль-

нейшем росте  $H$  значение коэффициента концентрации не меняется, т.е. остается постоянным. (Здесь под коэффициентом концентрации понимается отношение максимального давления грунта на трубу, возникающего в замке, к приложенной на внешней границе упругой среды вертикальной нагрузке, моделирующей давление вышележащего грунта.)

Таким образом, какой высокой ни была бы насыпь, в расчетах всегда можно рассматривать только ту ее часть, которая ограничена по высоте расстоянием  $H = (2,5 - 3,0)D$  над трубой. Оставшуюся часть насыпи (расположенную выше расчетной области) можно смоделировать вертикальной нагрузкой, определяемой по закону гидростатики  $p = \gamma H$ . Данный эффект можно объяснить принципом локальности Сен-Венана, широко используемым при решении задач теории упругости [4, 6, 73, 106, 122, 142, 190, 215].

Полученный результат позволяет минимизировать размеры расчетной области однородной изотропной грунтовой среды, что особенно актуально при расчетах труб под высокими насыпями и туннелей глубокого заложения методом конечных элементов. Поскольку это позволяет уменьшить число таких элементов и, как следствие, повысить точность вычислений и снизить время расчета.

Минимизированная таким образом расчетная область носит название «активной зоны», а выбор ее размера – вторым критерием [205, 214].

Анализ полученных решений также показывает, что в случае проскальзывания грунта по поверхности жесткой трубы максимальное давление грунта на трубу  $\sigma_{\max}$  (приходящееся на ее замок) больше, чем в случае без проскальзывания. А в боковых сечениях трубы наблюдается обратное явление.

Также установлено, что с увеличением коэффициента Пуассона грунта насыпи  $\sigma_{\max}$  уменьшается.

Впервые аналитические решения линейной теории изотропной упругости для статики многониточных трубопроводов были опубликованы в работах [205, 214, 215]. В частности, им было получено асимптотическое решение статической задачи о сжатии в двух направлениях плоскодеформированной невесомой бесконечной среды, содержащей две трубы [202]. Эта задача была решена в перемещениях в биполярных координатах.

Кроме того, используя решение Савина Г.Н. [167] для жесткого эллиптического включения (основанное на развитии метода Колосова – Мухелишвили [136]), была выведена формула для оценки максимального давления грунта на трубопровод многониточной укладки, представленная в работах [205, 215].

Анализ полученных решений показал, что максимальное давление грунта на трубы  $\sigma_{\max}$ , уложенные в две нитки на расстоянии в свету  $l \leq 3,0D$  друг от друга, меньше, чем на одиночно уложенную трубу. Это объясняется перераспределением давления грунта на трубы, т.е. они разгружают друг друга. При этом горизонтальное давление со стороны соседней трубы больше, чем с противоположной стороны. С уменьшением числа ниток  $\sigma_{\max}$  увеличивается, достигая максимума в случае одиночно уложенной трубы [205, 214].

При определении давления грунта на трубопроводы с количеством ниток пять и более, можно заменить ряд из плотно уложенных труб четырьмя трубами, названным «периодом» труб – третий критерий [205, 214].

Под «периодом» труб подразумевается минимальное количество труб, при котором добавление с краю еще одной трубы практически не оказывает влияния на напряженно деформированное состояние (НДС) грунта вблизи центральной трубы. Данный эффект объясняется малым разгружающим влиянием удаленных друг от друга труб (локальностью концентрации напряжения в среде вблизи включения – следствием принципа локальности Сен-Венана).

Известно также аналитическое решение Бялера И.Я. [38, 39] для расчета двух и трех параллельных туннельных обделок кругового очертания, подверженных давлению горной породы. При решении задачи о сжатии в двух направлениях плоскодеформируемой линейно упругой изотропной среды, ослабленной несколькими подкрепленными полостями, Бялер И.Я. применил метод последовательных приближений.

На основании проведенных расчетов Бялер И.Я. сделал вывод о том, что напряжения на контуре обделок практически не зависят от расстояния между ними, чего нельзя сказать о напряжениях в грунтовой среде.

Кроме того, при размере целика, превышающем размер  $3,0D$ , напряжения в породе практически равны напряжениям в среде, ослабленной одним подкрепленным отверстием.

На основании первого вывода Бялер И.Я. приходит к заключению, что при расчете параллельных туннелей можно пользоваться решением для одиночного туннеля [42].

Впервые аналитическое решение трехмерной теории линейной изотропной упругости для одиночной трубы, уложенной в насыпи с переменным рельефом вдоль продольной оси трубопровода, было опубликовано в работах [204, 214-216].

Эта задача была решена в перемещениях в круговой цилиндрической системе координат методом разделения переменных, что позволило свести ее к одномерной краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемой методом последовательных приближений.

Кроме того, была получена верхняя оценка максимального давления грунта на многониточные трубы, уложенные под высокой насыпью с переменным продольным профилем, в виде произведения плоских решений для продольного и поперечного сечений системы трубы – грунт.

Такой метод решения хорошо известен из инженерной практики (при расчете мостов [58] и других сооружений) и позволяет воспользоваться уже готовыми решениями плоской задачи для поперечного сечения системы насыпь – многониточные трубы. Решение плоской задачи для продольного сечения этой системы было получено в декартовых координатах в перемещениях методом разделения переменных [204, 214, 215].

Анализ проведенных расчетов трехмерной линейно упругой изотропной задачи показал, что учет продольного профиля насыпи позволяет снизить расчетное давление грунта на трубу по сравнению с решением традиционной плоско деформированной задачи.

Теорию нелинейной упругости для расчета подземных трубчатых водопропускных сооружений впервые применил Бялер И.Я. [40]. Он получил приближенное аналитическое решение плоско деформированной задачи о сжатии среды из нелинейно упругого материала, содержащей подкрепленное отверстие. Для этого Бялер И.Я. воспользовался методом «упругих решений», основанным