

Ву Мань Хуан

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
БОЛЬШОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРОТИВ СДВИГА
ЭКЦЕНТРИЧНО ПРИЛОЖЕННОЙ НАГРУЗКОЙ**

Специальность 05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО СПбГПУ)

Научный руководитель:

Бухарцев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Храпков Анатолий Александрович, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела «Динамика и сейсмостойкость сооружений» ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

Смирнов Михаил Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика и строительные конструкции» ФГБОУ ВПО СПбГПУ

Ведущая организация

Открытое акционерное общество «Ленгидропроект»

Защита состоится «___» _____ 2013 г. в 10 часов на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 512.001.01 при ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук

Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных и важных вопросов, с которыми приходится встречаться при проектировании массивных сооружений на нескальных грунтах основания, является обеспечение устойчивости этих сооружений против сдвига. От правильного решения этого вопроса в значительной мере зависит эксплуатационная надежность сооружений, их долговечность. Особое значение эта проблема приобретает для гидротехнического строительства, поскольку гидротехнические сооружения обладают повышенной опасностью.

К таким сооружениям относятся, например, крайние секции бетонных плотин, на которые помимо действия основной нагрузки от давления воды оказывают дополнительное воздействие примыкающие к ним грунтовые плотины. Вследствие этого крайние секции воспринимают, как правило, нагрузки от внецентренного сжатия и крутящего момента. Поэтому в общем случае нарушение устойчивости крайних секций, подверженных кручению, сопровождается сдвигом с поворотом. В таких же условиях находятся подпорные стены откосов сопрягающих устоев водосбросных сооружений и направляющих конструкций сооружений на водных путях (рис.1).



Рис.1. Гидротехническое сооружение на канале им. Москвы

Эксцентричному нагружению от ледовых воздействий могут подвергаться также буровые платформы, находящиеся на шельфе арктических морей (рис.2).

Вместе с тем нормативные документы не в полной мере удовлетворяют потребностям проектировщиков при решении вопросов, связанных с оценкой устойчивости подобного рода сооружений. В этих документах приведены рекомендации по оценке устойчивости сооружений с прямоугольной подошвой, только для частного случая нагружения силой, парал-

лельной оси симметрии подошвы. Поэтому разработка более общей методики оценки устойчивости сооружений против сдвига с поворотом, пригодной для любой плоской формы подошвы сооружения, является **актуальной задачей**.



Рис.2. Буровая платформа

Цель и основные задачи исследования. Цель исследования – разработать общую расчетную методику, позволяющую выполнять оценку устойчивости сооружений с плоской подошвой произвольной формы при разнообразном приложении нагрузки и различных геологических условиях. Разработать рекомендации по использованию предлагаемой методики при проектировании широкого класса упомянутых гидротехнических сооружений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

разработать алгоритмы получения аналитических решений оценки устойчивости для элементов подошвы сооружения прямоугольной и треугольной формы в произвольной системе координат;

получить аналитическое решение оценки устойчивости сооружения с произвольной формой подошвы в удобной системе координат, синтезировав решения для элементов подошвы прямоугольной и треугольной формы;

разработать алгоритм определения координат полюса поворота;

разработать алгоритм поиска области пренебрежимо малых эксцентриситетов в окрестности центра кручения;

разработать надежный метод определения запаса устойчивости сооружения против сдвига с поворотом, основывающийся на общепринятой схеме предельных состояний и вероятностном подходе к определению расчетных значений параметров прочности грунтов основания;

разработать алгоритм решения системы нелинейных дифференциальных уравнений и вычислительную программу расчета на ПЭВМ как

инструмент для проведения исследований влияния различных параметров на устойчивость сооружений.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются гидротехнические сооружения большой жесткости, любого назначения, подверженные воздействию сдвигающих сил, приложенных эксцентрично по отношению к центру кручения плоской подошвы сооружения. Предметом исследования являются расчетные методы оценки устойчивости сооружения против сдвига эксцентрично приложенной нагрузкой.

Метод исследования. В работе использованы общие методы механики твердого тела и механики грунтов с критерием прочности Ш. Кулона для грунта основания.

Достоверность и обоснованность результатов исследования основывается на применении проверенных зависимостей математического анализа и физических законов механики, а также удовлетворительным совпадением полученных результатов с результатами решения тестовых задач других исследователей. Достоверность исследований также подтверждается хорошим согласованием данных автора и данных экспериментальных исследований других авторов.

Научная новизна работы заключается:

Разработана методика оценки устойчивости сооружений с плоской подошвой произвольной формы против сдвига с поворотом при произвольном нагружении и доведении этой разработки до практического применения. Основными моментами в этой методике являются:

– получение и решение системы нелинейных дифференциальных уравнений предельного равновесия жесткого сооружения с плоской подошвой произвольной формы, нагруженного эксцентричной нагрузкой;

– разработка нелинейной зависимости для определения нормальных напряжений по прямоугольной подошве сооружения по экспериментальным данным, полученным на крупномасштабной модели;

– разработка метода определения запаса устойчивости сооружения, основанного на традиционной схеме предельного равновесия и вероятностном подходе к определению расчетных значений параметров прочности грунтов.

– составление алгоритма численного решения и программы расчета, позволяющих найти полюс поворота сооружения при нарушении предельного равновесия и далее определить коэффициент запаса устойчивости против сдвига с поворотом.

Практическая значимость работы заключается в доведении разработанной методики для оценки устойчивости сооружений до практического применения, что позволит повысить обоснованность принимаемых технических решений при проектировании конкретных гидротехнических сооружений, например, бетонных плотин, направляющих сооружений и морских гидротехнических сооружений. Практическая значимость подтверждается использованием полученных в работе результатов в ОАО

«Ленгидропроект» для предварительной оценки устойчивости отдельно стоящих бетонных гидротехнических сооружений. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задачи, разработке алгоритма решения системы нелинейных дифференциальных уравнений и вычислительной программы расчета на ПЭВМ. Автором осуществлены примеры расчета по разработанной методике, проведено сопоставление с результатами других исследователей.

На защиту выносятся упомянутые положения научной новизны, а именно:

1. Методика выполнения оценки устойчивости против сдвига с поворотом сооружений с плоской подошвой произвольной формы, нагруженных произвольной нагрузкой.

2. Метод учета нелинейности распределения нормальных напряжений по прямоугольной подошве сооружения.

3. Метод нахождения координат полюса поворота сооружения, подверженного воздействию эксцентрично приложенных сдвигающих сил, при выполнении оценки его устойчивости.

4. Наглядный метод для определения запаса устойчивости сооружения, основанный на использовании схемы предельного равновесия и вероятностного подхода к определению расчетных значений параметров прочности грунтов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором на научно-практических конференциях с международным участием в рамках XXXIX, XL и XLI недель науки СПбГПУ, на семинаре кафедры Водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и на заседании секции Ученого совета «Основания и грунтовые сооружения» ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Публикации. По теме диссертации опубликовано девять научных статей, из них пять - в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературных источников. Диссертация, общим объемом 97 стр., содержит 33 рисунка, 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены: анализ состояния вопроса, обзор литературных источников, актуальность темы, цель и задачи исследования, постановка задачи.

Отмечено, что одним из основных и важных вопросов, с которым приходится встречаться при проектировании подпорных сооружений на нескальных грунтах основания, является обеспечение устойчивости этих сооружений против сдвига. От правильного решения этого вопроса в значительной мере зависит эксплуатационная надежность сооружений, их

долговечность. Особое значение эта проблема приобретает для гидротехнического строительства, поскольку гидротехнические сооружения обладают повышенной опасностью и, следовательно, несут большую социальную и экономическую ответственность. К таким сооружениям относятся, например, плотины, здания ГЭС, подпорные стены и т.п.

В настоящее время в мировой практике для оценки устойчивости массивных бетонных сооружений чаще всего используется расчетный метод, в котором предполагается, что при нарушении устойчивости сооружение перемещается по плоскости подошвы прямолинейно поступательно.

Для оценки устойчивости бетонных сооружений против сдвига с поворотом современные российские нормативные документы рекомендуют другой метод, который является обобщением упомянутого выше метода. Этот метод, используемый для дальнейшего исследования, применим для любой формы плоской подошвы сооружения, при произвольном его нагружении и геологическом строении основания, грунты которого подчиняются критерию прочности Ш. Кулона.

Вместе с тем рекомендации нормативных документов не в полной мере охватывают потребности проектировщиков при решении вопросов, связанных с оценкой устойчивости подобного рода сооружений. В этих документах приведены рекомендации по оценке устойчивости сооружений с прямоугольной подошвой, только для частного случая нагружения силой, параллельной оси симметрии подошвы (оси инерции сечения подошвы). Поэтому разработка более общей методики оценки устойчивости сооружений против сдвига с поворотом, пригодной для любой плоской формы подошвы сооружения, является актуальной задачей.

В первой главе изложены расчетные предпосылки метода, используемого для оценки устойчивости сооружения против сдвига с поворотом.

В основе метода лежит широко распространенное положение о том, что при повороте любого тела касательные напряжения, действующие на элементарных площадках в плоскости подошвы, ориентированы ортогонально радиус-векторам, проведенным к центрам этих площадок из полюса поворота (рис.3). Это положение проверено экспериментально А.Ф. Поповым.

Для оценки устойчивости сооружения против сдвига с поворотом используется схема предельных состояний с критерием прочности грунта основания по Ш. Кулону:

$$\tau \leq \tau_{np} = f\sigma + c, \quad (1)$$

где τ_{np} – предельное значение касательного напряжения на какой-либо площадке контактной плоскости подошвы сооружения с основанием; σ – нормальное напряжение на той же площадке; $f = \operatorname{tg}\varphi$ и c – прочностные параметры прочности грунта основания.

Предполагается, что при потере устойчивости сооружение перемещается в плоскости подошвы не линейно поступательно, а совершает поворот относительно некоторой оси, ортогональной плоскости подошвы и

проходящей через полюс p , положение которого определяется в результате расчета.

Условия равновесия сил, действующих на сооружение в предельном состоянии, при отсутствии опора грунта по вертикальным граням сооружения или жесткой опоры, выражаются в удобной системе координат xOy уравнениями:

$$\sum X = 0: Q_x k_3 - \int_F \tau_{np} \cos \alpha dF = 0, \quad (2)$$

$$\sum Y = 0: Q_y k_3 - \int_F \tau_{np} \sin \alpha dF = 0, \quad (3)$$

$$\sum M_p = 0: \left[Q_y (x_Q - x_p) - Q_x (y_Q - y_p) \right] k_3 - \int_F \tau_{np} \rho dF = 0, \quad (4)$$

где Q_x, Q_y – компоненты сдвигающей силы в направлении координатных осей; x_0, y_0 – плечи этих сил относительно центра тяжести сечения подошвы сооружения; k_3 – коэффициент запаса устойчивости; F – площадь подошвы; α – угол отклонения линии действия элементарной силы $\tau_{np} dF$ от направления оси x в изображенной на рис.3 системе координат с началом в произвольной точке (за положительное направление принят поворот против часовой стрелки); x_p, y_p – координаты полюса поворота.

В эту систему уравнений входят три неизвестные величины: коэффициент запаса устойчивости, выражающийся явно из любого уравнения, и координаты полюса поворота сооружения, для итерационного вычисления которых используются два других уравнения, после предварительного исключения из них коэффициент запаса.

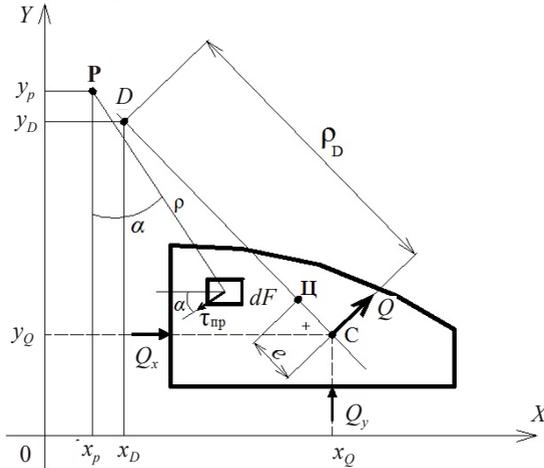


Рис.3. Схема к оценке устойчивости сооружения против сдвига с поворотом

Радиус-вектор ρ для элементарной силы $\tau_{np} dF$ и тригонометрические функции определяются выражениями:

$$\rho = \pm \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}, \quad \sin \alpha = \frac{x - x_p}{\rho}, \quad \cos \alpha = -\frac{y - y_p}{\rho}. \quad (5)$$

Знак перед корнем в выражении для ρ совпадает со знаком крутящего момента сдвигающих сил относительно упомянутого центра кручения: плюс соответствует повороту против часовой стрелки, минус – в противоположном направлении. Крутящий момент определяется выражением:

$$M_{кр} = Q_y(x_Q - x_{кр}) - Q_x(y_Q - y_{кр}). \quad (6)$$

Координаты центра кручения, совпадающего с центром тяжести эпюры τ_{np} , построенной для всей площади подошвы, определяются выражениями:

$$x_{кр} = \frac{\int_F x \tau_{np} dF}{\int_F \tau_{np} dF}, \quad y_{кр} = \frac{\int_F y \tau_{np} dF}{\int_F \tau_{np} dF}. \quad (7)$$

Нормальные напряжения, действующие по подошве сооружения, определяются независимо из трех не приведенных здесь уравнений равновесия. Проще всего их определить по формуле внецентренного сжатия, которая в главной центральной системе координат uOv представляется в виде:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M_v}{J_v} u + \frac{M_u}{J_u} v. \quad (8)$$

В работе А.А. Лукашевича использован другой закон распределения нормальных напряжений по подошве сооружения, основанный на решении упругопластической задачи методом конечных элементов. Анализ результатов расчетов этими двумя методами подтвердил хорошее их совпадение.

Координаты главной центральной системы uOv связаны с координатами удобной системы xOy , повернутой на угол θ и смещенной по осям на x_c, y_c , зависимостями:

$$u = (x - x_c) \cos \theta - (y - y_c) \sin \theta, \quad (9)$$

$$v = (y - y_c) \cos \theta - (x - x_c) \sin \theta$$

После подстановки этих выражений в (8), в том числе и в выражения для M_v, M_u, J_v, J_u , получается общее выражение для σ в системе координат xOy .

В систему уравнений (2), (3), (4) входят четыре типа интегралов, относящихся к одной группе:

$$\int_F \frac{s dF}{\sqrt{s^2 + t^2}}; \quad \int_F \frac{stdF}{\sqrt{s^2 + t^2}}; \quad \int_F \frac{s^2 dF}{\sqrt{s^2 + t^2}}; \quad \int_F s \sqrt{s^2 + t^2} dF; \quad dF = ds dt. \quad (10)$$

Эти интегралы выражаются через конечное число элементарных функций только при описании пределов интегрирования линейными функциями. Поэтому в общем виде задача решается численно с разбиением подошвы для расчета на прямоугольные и треугольные элементы, но не малые, как в методе конечных элементов, а произвольных размеров.

Предлагаемую методику по оценке устойчивости сооружений против сдвига с поворотом можно распространить и на более общий случай нелинейного распределения нормальных напряжений, возникающих на контакте сооружения с основанием. Для этого формулу внецентренного сжатия следует дополнить некоторой функцией, позволяющей с достаточным для практики приближением описать упомянутые напряжения, получаемые экспериментально.

Этот дополнительный член в расширенной таким образом формуле должен описывать отклонения от плоской эпюры, самоуравновешенные для всей плоскости подошвы.

Представляется, что для сооружений с прямоугольной подошвой, имеющих наибольшее распространение, это можно сделать, представив расширенную формулу в виде:

$$\sigma = \left(\frac{N}{F} + \frac{M_y}{J_y} x + \frac{M_x}{J_x} y \right) + \hat{\sigma} \left(1 - \frac{F}{J_x} y^2 \right) + \hat{\sigma} \alpha F \left(\frac{y^2}{J_x} - \frac{x^2}{J_y} \right), \quad (11)$$

В этой формуле выражения, заключенные в скобки, являются характеристическими функциями для распределения нормального напряжения: первая описывает плоскость, вторая – цилиндр с параболической направляющей, третья – сложную поверхность двойкой кривизны (седло).

Параметры $\hat{\sigma}$ и α не имеющие пока механической интерпретации, позволяют создать комбинацию характеристических функций, приближенно описывающую вид эпюры напряжений в широком диапазоне механических характеристик грунтов. Видимо, параметр α можно связать с коэффициентом Пуассона, а параметр $\hat{\sigma}$ – с модулем деформации. Параметр $\hat{\sigma}$ отражает отклонение значения нормального напряжения в центре тяжести подошвы от среднего значения. Знак этого параметра определяет знак кривизны эпюры напряжений: плюс соответствует выпуклой эпюре, минус – вогнутой.

Представление нормальных напряжений в виде (11) хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований (рис.4), выполненных Т.Ф. Липовецкой во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева на крупномасштабной модели, представляющей собой жесткий штамп на песчаном основании.

Использование выражения (11) при оценке устойчивости сооружения против сдвига с поворотом принципиально не меняет методику расчета. Добавляется еще один тип интегралов, относящийся к той же группе

$$\int_F \frac{s^3 dF}{\sqrt{s^2 + t^2}}.$$

Вторая глава посвящена разработке методики поиска положения полюса, относительно которого происходит поворот сооружения при потере устойчивости. Поскольку некоторые функции, входящие в систему уравнений равновесия (2), (3) и (4), имеют ограниченные области определе-

ния, то для решения задачи желательно ограничить область поиска относительно малой окрестностью, в пределах которой итерационный процесс решения задачи не выходит за пределы области определения всех функций.

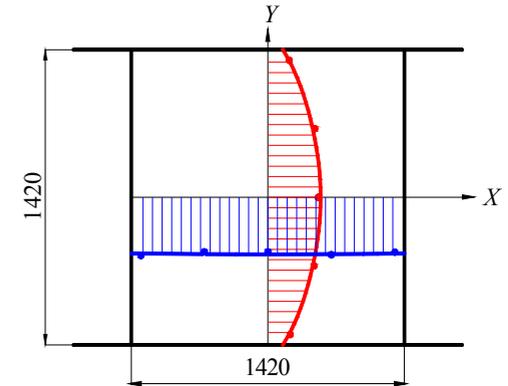


Рис.4. Сопоставление теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (точки) данных

В основу поиска такой области положена гипотеза о том, что полюс поворота располагается в окрестности некоторой точки $D(x_D; y_D)$, лежащей на прямой, которая ортогональна линии действия сдвигающей силы и проходит через центр кручения подошвы (рис.3). Расстояние от центра кручения до этой точки определяется выражением:

$$\rho_D = \eta \frac{F}{e}, \quad (12)$$

где F – площадь подошвы; e – эксцентриситет линии действия сдвигающей силы относительно центра кручения подошвы сооружения; η – некоторый числовой коэффициент, учитывающий форму подошвы, влияние параметров прочности грунта и т.д., значение которого определяется экспериментально в результате численного моделирования.

Проекция линии действия равнодействующей всех сдвигающих сил на плоскость подошвы сооружения выражается зависимостью

$$y - y_Q = \frac{Q_y}{Q_x} (x - x_Q). \quad (13)$$

Ортогональная ей линия, проходящая через центр кручения сечения подошвы, определяется выражением:

$$y - y_{кр} = -\frac{Q_x}{Q_y} (x - x_{кр}). \quad (14)$$

Координаты точки пересечения этих прямых $C(x_C; y_C)$:

$$x_C = x_{кр} + Q_y \frac{(x_Q - x_{кр}) Q_y - (y_Q - y_{кр}) Q_x}{Q^2}, \quad y_C = y_{кр} - \frac{Q_x}{Q_y} (x_C - x_{кр}), \quad (15)$$

где $Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$ – равнодействующая сдвигающих сил – главный вектор сдвигающих сил.

Эксцентриситет главного вектора относительно центра кручения определяется выражением:

$$e = \sqrt{(x_c - x_{кр})^2 + (y_c - y_{кр})^2}, \quad (16)$$

Расстояние от центра кручения до точки D

$$\rho_D = \sqrt{(x_D - x_{кр})^2 + (y_D - y_{кр})^2}. \quad (17)$$

Зависимости для вычисления координат точки $D(x_D; y_D)$ – точки пересечения прямой (14) с окружностью (17):

$$x_D = x_{кр} - \rho_D \frac{Q_y}{Q} \frac{x_c - x_{кр}}{\sqrt{(x_c - x_{кр})^2}}, \quad (18)$$

$$y_D = y_{кр} - \rho_D \frac{Q_x}{Q} \frac{y_c - y_{кр}}{\sqrt{(y_c - y_{кр})^2}}.$$

В выражениях (18) во вторые слагаемые введена функция знака, позволяющая обеспечить расположение центра кручения и точки D с одной стороны от главного вектора сдвигающей силы, проходящего через точку C .

Как следует из анализа выражения (12), при малых эксцентриситетах главного вектора сдвигающих сил относительно центра кручения расстояние до полюса поворота становится весьма большим, а результат мало отличается от результата при поступательном сдвиге. При этом возникают вычислительные трудности при определении координат полюса поворота. Поэтому оценку устойчивости по схеме «сдвиг с поворотом» рационально выполнять только при значительных эксцентриситетах, когда значение коэффициента запаса устойчивости по упомянутой схеме отличается от значения коэффициента запаса по схеме поступательного сдвига не менее чем на 0,01.

Для выявления малой области в окрестности центра кручения, в пределах которой эксцентриситетом приложения сдвигающей силы можно по малости пренебречь, выполнено исследование влияния эксцентриситета на коэффициент запаса устойчивости для сооружения с прямоугольной подошвой. Более сложная форма подошвы принципиально ничего не меняет, усложняя вычисления. Исследование проведено для разных соотношений сторон прямоугольной подошвы, чтобы установить влияние этого параметра на значение коэффициента запаса устойчивости.

В третьей главе описан алгоритм решения задачи и программа вычислений на ЭВМ, составленная на языке C++. Программа, блок-схема которой представлена на рис. 5 и 6, содержит блок исходных данных и вычислительные циклы, имеющие определенную последовательность.

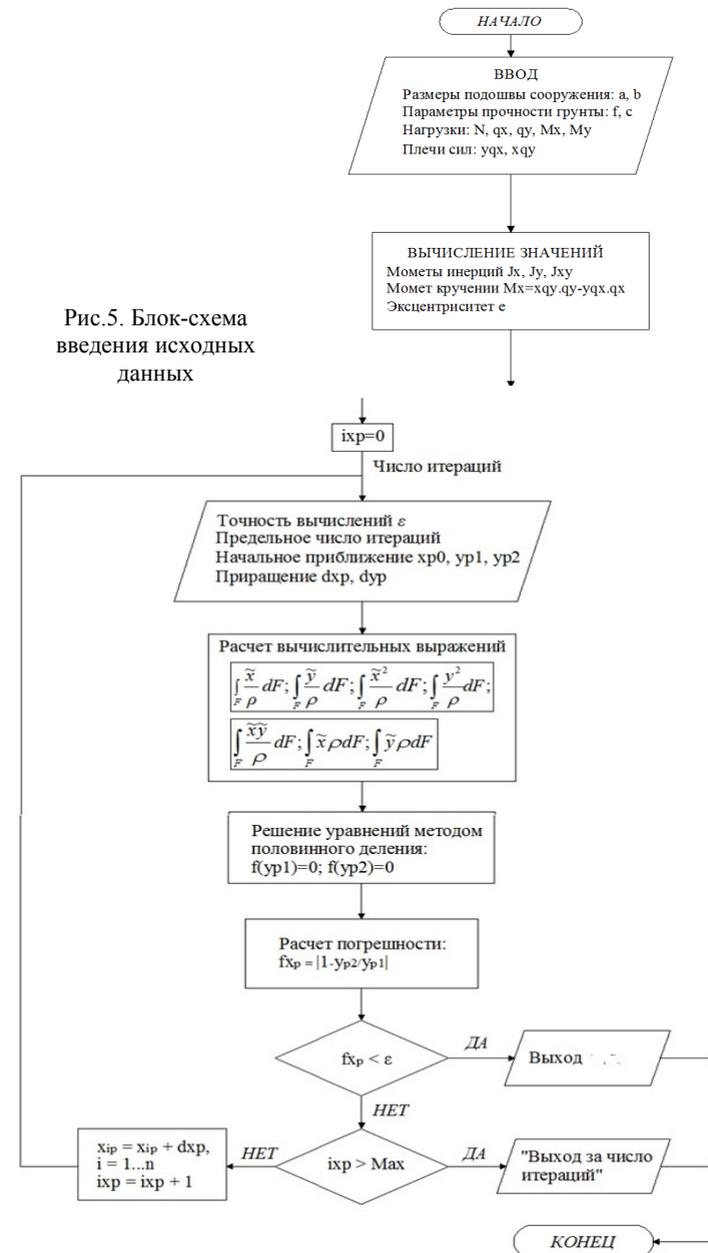


Рис. 6. Блок-схема программы поиска полюса поворота сооружения при потере его устойчивости

Разработанный алгоритм численного решения задачи и программа расчета позволяют найти координаты полюса поворота сооружения и в дальнейшем определить коэффициент запаса устойчивости против сдвига с поворотом.

В четвертой главе представлены результаты исследования по оценке запаса устойчивости сооружения против сдвига с поворотом, основывающейся на общепринятой схеме предельного равновесия и вероятностном подходе к определению расчетных значений параметров прочности грунтов.

Поскольку методика определения расчетных значений f и c , рекомендованная нормативными документами, в ряде случаев создает погрешность в сторону риска и содержит непоследовательность использования вероятностного подхода, мешающую переходу к реальной оценке надежности на основе вероятностного подхода, предложена другая методика, лишенная отмеченных недостатков. Она основана на использовании U-распределения случайной величины $\tau_{пр}$.

Границы доверительной зоны для всей регрессии в целом в диапазоне расчетных значений нормальных напряжений $\sigma \in [\sigma_{\min}; \sigma_{\max}]$ определяются выражениями:

$$\tilde{\tau}(\sigma) = f_n \sigma + c_n \pm \beta_u \sqrt{(\sigma - \bar{\sigma})^2 + \Delta}, \quad (19)$$

где $f_n = \text{tg}\varphi_n = \frac{1}{\Delta}(\bar{\sigma}\bar{\tau} - \bar{\sigma}\bar{\tau})$ и $c_n = \frac{1}{\Delta}(\bar{\sigma}^2\bar{\tau} - \bar{\sigma}\bar{\sigma}\bar{\tau})$ – нормативные значения

параметров прочности грунта; $\beta_u = \frac{su_{\alpha,\lambda,v}}{\sqrt{v\Delta}}$, $u_{\alpha,\lambda,v}$ – квантиль U-распределения,

определяемый в зависимости от доверительной вероятности $1-\alpha$, числа степеней свободы v и диапазона расчетных значений σ ,

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tau_i - f_n \sigma_i - c_n)^2}, \quad \Delta = \bar{\sigma}^2 - \bar{\sigma}^2, \quad \bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i, \quad \bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2,$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad \bar{\sigma}\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \tau_i, \quad \sigma_i \text{ и } \tau_i - \text{парные частные значения нормальных}$$

и предельных касательных напряжений, действующих на площадках сдвигов, полученные в отдельных испытаниях. Для линейной регрессии при $c \neq 0$ $v = n - 2$, при $c = 0$ $v = n - 1$.

Выражения (19), в которых знак плюс соответствует верхней границе доверительной зоны, а минус – нижней, описывают две ветви гиперболы (рис.7), канонический вид которой определяется выражением:

$$\frac{[\tilde{\tau}(\sigma) - (f_n \sigma + c_n)]^2}{\beta_u^2 \Delta} - \frac{(\sigma - \bar{\sigma})^2}{\Delta} = 1. \quad (19^*)$$

Для упрощения сопоставления расчетных значений параметров с их критическими значениями рационально перейти от системы координат $\sigma\tau$

к системе координат $f\sigma c$, в которой любая прямая $\tau(\sigma) = f\sigma + c$ с расчетными значениями параметров прочности грунта f и c , располагающаяся в пределах доверительной зоны, отображается на координатной плоскости $f\sigma c$ точкой. Это дает возможность на этой плоскости построить доверительную область расчетных значений f и c . Очевидно, границами этой области является совокупность точек, отображающих касательные к границам доверительной зоны на координатной плоскости $\sigma\tau$:

$$\frac{[c_n + f_n \bar{\sigma} - (c + f \bar{\sigma})]^2}{\beta_u^2 \Delta} + \frac{(f_n - f)^2}{\beta_u^2} = 1. \quad (20)$$

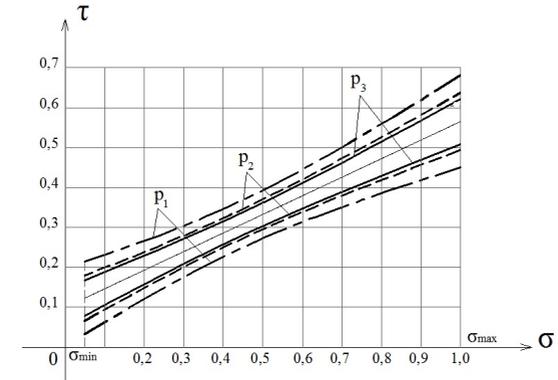


Рис. 7. Графики границ доверительных зон для линейной регрессии, построенные для трех вероятностей: $P_1 = 0,99$; $P_2 = 0,95$; $P_3 = 0,90$.

Это эллипс с полуосями $\beta_u \sqrt{\Delta}$ и β_u . По физическим соображениям на расчетные значения параметров f и c следует наложить ограничения: $f \geq 0$, $c \geq 0$; одновременно f и c не должны обращаться в нуль. На рис.8 представлены графики критических значений f и c при сдвиге с поворотом (1) и поступательном сдвиге (2), а также графики расчетных значений f и c , построенные для трех значений вероятностей: 0,90; 0,95; 0,99.

Функциональная связь критических значений параметров f и c мало отличается от линейной, поскольку во все уравнения равновесия τ_k входит в первой степени. Для сдвига с поворотом эта функциональная связь, получаемая из третьего уравнения равновесия, определяется выражением:

$$c_k = \frac{1}{\int_F \rho dF} \left[Q_y (x_Q - x_p) - Q_x (y_Q - y_p) - f_k \int_F \rho dF \right]. \quad (21)$$

Минимальному запасу устойчивости при заданном уровне надежности соответствует точка эллипса, максимально приближенная к линии критических значений.

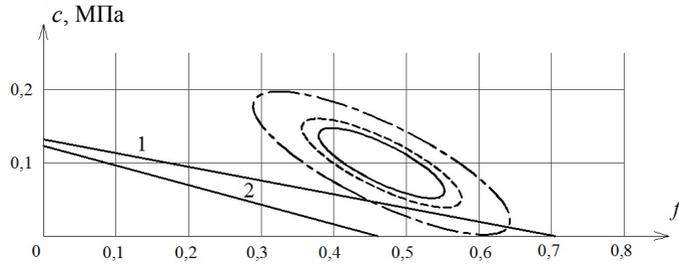


Рис.8. Графики критических и расчетных значений параметров f и c грунта основания:
 a – для поступательного сдвига; b – для сдвига с поворотом

Если запас устойчивости оценивать традиционным способом – введением единого коэффициента запаса, то параметры прочности следует преобразовать, чтобы они имели одну размерность. Для этого параметр c надо заменить безразмерным параметром $t = \frac{c + f\bar{\sigma}}{\sqrt{\Delta}}$, оставив вторым параметром f . Новый параметр больше соответствует физическому смыслу, поскольку значение параметра становится непосредственно связанным с диапазоном экспериментальных значений σ .

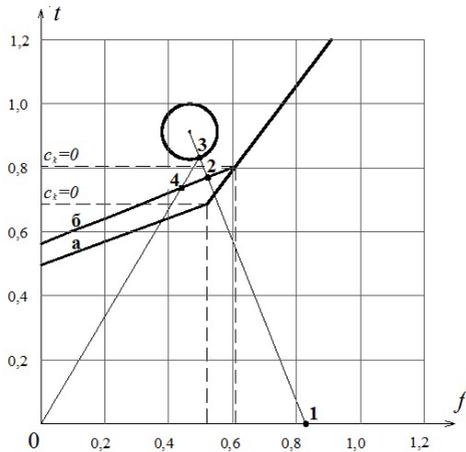


Рис.9. Графики критических и расчетных значений параметров f и c грунта основания:
 a – для поступательного сдвига; b – для сдвига с поворотом

В новой координатной системе эллипсы, изображенные на рис.8, отображаются окружностями с центрами в точке $f_n, t_n = \frac{c_n + f_n\bar{\sigma}}{\sqrt{\Delta}}$ и радиу-

сами β_u . Линия критических значений параметров прочности по-прежнему остается близкой к прямой:

$$t_k = \lambda - \frac{f_k}{\vartheta}, \quad (22)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{1}{J_1} [Q_y(x_Q - x_p) - Q_x(y_Q - y_p)], \quad \vartheta = \frac{v\sqrt{\Delta}}{\sqrt{\Delta} - v\bar{\sigma}}, \quad v = \frac{J_1}{J_2},$$

$$J_1 = \sqrt{\Delta} \int_F \rho dF, \quad J_2 = \int_F \sigma \rho dF.$$

Коэффициент запаса определяется как частное от деления длин двух отрезков, ограниченных тремя точками $1(f_1; t_1), 2(f_2; t_2), 3(f_3; t_3)$, лежащими на нормали к линии критических значений, проходящей через центр окружности (рис.7):

$$k_3 = \frac{\sqrt{(f_3 - f_1)^2 + (t_3 - t_1)^2}}{\sqrt{(f_2 - f_1)^2 + (t_2 - t_1)^2}} = \frac{f_3 - f_1}{f_2 - f_1} = \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1}, \quad (23)$$

где, для рассматриваемой задачи, $f_1 = f_n - \frac{t_n}{\vartheta}, t_1=0; f_2 = f_k = \vartheta \frac{f_n\vartheta + \lambda - t_n}{1 + \vartheta^2},$

$$t_2 = t_k = \frac{t_n + (\lambda\vartheta - f_n)\vartheta}{1 + \vartheta^2}; f_3 = f = f_n - \frac{\beta_u}{\sqrt{1 + \vartheta^2}}, t_3 = t = t_n - \frac{9\beta_u}{\sqrt{1 + \vartheta^2}}.$$

При использовании традиционного способа (предложение В. Феллениуса) коэффициент запаса определяется выражением:

$$k_3 = \frac{f_3}{f_4} = \frac{t_3}{t_4} = \frac{f_3 + \vartheta t_3}{\lambda\vartheta}, \quad \text{где } f_4 = \frac{\lambda\vartheta f_3}{f_3 + \vartheta t_3}, \quad t_4 = t_3 \frac{f_4}{f_3}. \quad (24)$$

Вычислениями установлено, что традиционный метод определения коэффициента запаса создает погрешность в сторону риска.

Если вводить вероятностную оценку, то, используя функцию распределения вероятностей, следует определить вероятность a , при которой круг, определяющий расчетные значения параметров прочности грунта, касается линии критических значений, что соответствует достижению предельного равновесия.

Таким образом, запас устойчивости определяется как мера удаления расчетных значений f и c от линии критических значений параметров прочности грунта, соответствующих предельному равновесию сооружения.

Строго говоря, линия критических значений параметров прочности грунта тоже имеет вероятностный характер через разброс результатов определения удельного веса материала сооружения (например, бетона). Но учет этого обстоятельства ничего принципиально не меняет, несколько усложняя вычисления. Кроме того, разброс результатов определения

удельного веса бетона существенно меньше разброса результатов определения f и c .

Основные результаты работы и выводы

1. Разработана расчетная методика оценки устойчивости внецентреннонагруженных массивных сооружений с плоской подошвой произвольной формы, применимая для различных геологических условий.

2. Разработаны алгоритмы и получены аналитические решения оценки устойчивости для элементов подошвы сооружения прямоугольной и треугольной формы, а также для произвольной формы подошвы сооружения.

3. Получено аналитическое решение оценки устойчивости сооружения, позволяющее учитывать нелинейность распределения нормального напряжения по подошве прямоугольной формы.

4. Разработан алгоритм определения координат полюса поворота, позволяющий осуществлять поиск решения в области определения используемых функций, и алгоритм поиска области пренебрежимо малых эксцентриситетов в окрестности центра кручения.

5. Разработан алгоритм решения системы нелинейных дифференциальных уравнений и составлена вычислительная программа расчета на ПЭВМ.

6. Разработан надежный метод определения запаса устойчивости сооружения против сдвига с поворотом, основывающийся на общепринятой схеме предельных состояний и вероятностном подходе к определению расчетных значений параметров прочности грунтов основания.

Разработанная методика оценки устойчивости эксцентрично нагруженных сооружений, доведенная до практического применения, позволит повысить обоснованность принимаемых технических решений при проектировании конкретных гидротехнических сооружений.

Публикации

1. Бухарцев В.Н., Ву Мань Хуан. Оценка устойчивости эксцентрично нагруженных бетонных сооружений на нескальном основании / Сборник материалов научно-технического семинара, посвященного 75-летию на факультете кафедры СКИМ, Изд. политехнического университета. СПб. 2009.

2. Бухарцев В.Н., Ву Мань Хуан. Оценка устойчивости бетонных сооружений на нескальном основании против сдвига с поворотом / Гидротехническое строительство. 2011. № 4. с. 28-32.

3. Бухарцев В.Н., Ву Мань Хуан, Оценка устойчивости бетонных сооружений на нескальном основании против сдвига с поворотом / Приволжский научный журнал. №3. 2012. с.34-42.

4. Бухарцев В.Н., Ву Мань Хуан, Поиск полюса поворота при оценке устойчивости бетонных сооружений против сдвига с поворотом / Инженерно-строительный журнал. №6. 2013.

5. Бухарцев В.Н., Ву Мань Хуан, Повышение надежности оценки устойчивости бетонных сооружений на нескальном основании против сдвига с поворотом / Гидротехническое строительство. №11. 2012.

6. Бухарцев В.Н., Ву Мань Хуан, Оценка устойчивости бетонных сооружений на нескальном основании / СПбГПУ. Инженерно-строительный журнал. №1. 2013.

7. Ву Мань Хуан, Бухарцев В.Н. Оценка устойчивости против сдвига верхового открьлка сопрягающего устоя водосливной плотины // Сборник материалов XXXIX Недели науки СПбГПУ. 2010.

8. Ву Мань Хуан, Бухарцев В.Н. Поиск полюса поворота при оценке устойчивости бетонных сооружений на нескальном основании против сдвига с поворотом // Сборник материалов XL Недели науки СПбГПУ. 2011.

9. Ву Мань Хуан, Оценка устойчивости против сдвига с поворотом бетонных сооружений на нескальном основании // Сборник материалов XLI Недели науки СПбГПУ. 2012.

Типография ООО «Наша Марка»
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100. Заказ 8.