

Методы расчета подпорных стен – краткий обзор публикаций

УДК 69.059

Евтушенко Сергей Иванович

доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132),
e-mail: evtushenko_s@novoch.ru;

Волков Владимир Сергеевич

магистрант кафедры «Промышленное и гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132),
e-mail: s98604@mail.ru;

Аннотация: В статье приводится обзор публикаций по методам расчета и экспериментальным исследованиям подпорных стен

Ключевые слова: подпорные сооружения, методы расчета, экспериментальные исследования

Calculation methods of retaining walls – brief review of publications

Sergey Evtushenko

Doctor of Engineering, Professor, student of Department «Industrial and Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk, Prosvecheniya st. 132);
e-mail: evtushenko_s@novoch.ru;

Vladimir Volkov

master student of Department «Industrial and Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (Novocherkassk), (Novocherkassk, Prosvecheniya st. 132);
e-mail: s98604@mail.ru;

Abstract. The article presents a review of publications on methods of calculation and experimental studies of retaining walls

Keywords: retaining wall, the methods of calculation, experimental research

Статья посвящена обзору отечественных и зарубежных публикаций по расчетам подпорных стен. Подпорные стены в настоящее время имеют широкое применение в практике строительства в России и за рубежом и используются при строительстве целого ряда сооружений различного

назначения. Стремительные темпы научно-технического прогресса и широкое применение принципов рационального проектирования делают совершенствование методов расчета подпорных стен весьма актуальной задачей.

Проведенный обзор работ содержит как развитие теоретических исследований, так и результаты экспериментальных исследований работы подпорных стен. Обращено особое внимание публикациям в журнале «Основания, фундаменты и механика грунтов», значительная часть статей которого переведена на английский язык и широко известна за рубежом.

В статье [1] Н.К. Снитко развивает решение об определении бокового давления сыпучего тела с учетом смещения клина сползания и трения по его боковым граням при решении пространственной задачи, развивая предложенные в [2] решения.

В работах [3 - 7] Ф.И. Шихиев и П.И. Яковлев в отличие от работ [2, 8] развивают решение об определении бокового давления многослойной засыпки на подпорную стенку. Вначале решена задача для случая, когда у слоев одинаковый угол внутреннего трения, но разный объемный вес, как это бывает при учете взвешивающего действия воды ниже уровня грунтовых вод. Для каждого слоя определяют площадки скольжения, объемные силы и построением силового многоугольника определяют равнодействующую активного давления на подпорную стенку. Аналитическое решение этой задачи было получено П.И. Яковлевым ранее [7]. Для случая, когда у слоистой засыпки отличаются φ и γ , авторы рассмотрели три возможных траектории прохождения поверхности скольжения и методом последовательных приближений получили давление на подпорную стенку с достаточной точностью и привели два примера решения с конкретными числовыми данными.

П.И. Яковлев провел опыты по исследованию работы подпорных стенок с одной [9] и двумя разгружающими плитами [4], в которых экспериментально получил равнодействующую активного давления при

разной величине смещения подпорной стенки. При смещении подпорной стенки с одно и двумя разгружающими плитами в грунте обратной засыпки образуются внутренняя и внешняя поверхности скольжения. Автором использовались месдозы и были получены эпюры контактных давлений на подпорную стенку.

В работе [5] выполнен анализ экспериментальных работ разных авторов [6, 7, 10] и получены зависимости критических смещений в зависимости от разных факторов (шероховатость подпорной стенки, свойств грунта обратной засыпки и др.) и рекомендовано активное давление определять по полученным формулам.

Клейн Г.К. в продолжение работы [8] предложил статистический подход к выбору оптимальных, с точки зрения стоимости, размеров подпорных стен [11]. Реализация метода статистических испытаний в виде алгоритма многократного моделирования вектора вероятности на ЭВМ позволяет получить оптимальное решение.

В опытах проведенных М.Н. Варгиным в 1964-1965 годах [12] исследовалась работа подпорной стенки на скальном основании. В качестве грунта обратной засыпки использовался сухой и водонасыщенный песок. К поверхности засыпки прикладывалась ступенчато равномерно распределенная по поверхности полезная нагрузка. Использование тензометрических приборов позволило выявить криволинейный характер эпюры давления на подпорную стенку и расположение равнодействующей давления на высоте $0,35 - 0,47 h$, что при смещении подпорной стенки приводит к увеличению общего опрокидывающего момента. Т.о. выявлено несоответствие действительной работы подпорной стенки расчетным схемам по Кулону.

В опытах Бугрова А.К. [13] получена зависимость коэффициента постели от величины давления и уплотнения грунта засыпки и выявлен нелинейный характер зависимости предельного смещения подпорной стенки от глубины нахождения поверхности скольжения. Предложена

формула определения смещения подпорной стенки хорошо согласующаяся с опытами А.З. Зархи [14], что позволило получить формулу для определения давления грунта на подпорную стенку при известном смещении с результатом приемлемым для практического применения.

Будин А.Я. [15, 16] предложил использовать грунтовые анкеры в подпорных стенках с упругими компенсаторами в дополнение к ранее проведенным исследованиям [17]. Получено выражение для коэффициента жесткости компенсатора при котором усилие в анкере снижается до заданной допустимой величины. Затем получена формула для определения перемещения анкера во времени. Это позволяет подбирать параметры упругих компенсаторов и проектировать анкеры с заданной долговечностью.

Для обратной засыпки подпорных стен редко используются набухающие грунты и разрешению этого вопроса посвящена работа Е.А. Сорочан [18]. Активное давление при этом суммируется с. На основе полевого эксперимента и дополнительных опытов с хвалынской и покровной глинах определено давление набухания на подпорную стенку при ее смещении, а также эффект введения в грунт обратной засыпки сильносжимаемого материала (крошки пенопласта). Предложена температурно-влажностная модель набухающего грунта для исследования НДС грунта засыпки реализованная в МКЭ. Выполнено сравнение НДС с результатами полевых испытаний [19].

При устройстве подпорных стен на склонах к активному давлению добавляется оползневое давление [20, 21]. Использование ЭВМ позволило Л.К. Гинзбургу просчитывать несколько возможных поверхностей скольжения и за расчетную поверхность принимать наиболее опасную. В статье [20] приведены пример реализации подпорной стены и подпорной стены на свайном фундаменте с контрбанкетом, а также рекомендации по усилению существующих стен. Результаты опытов на моделях противооползневых конструкций из нескольких рядов свай описаны в [22].

Выполнен анализ величины изгибающих моментов по длине тензосвай при использовании различных грунтов моделирующих оползневую толщу. Проводилось моделирование заделки нижних концов свай в прочное основание выявлено распределение усилий между рядами свай при свободных верхних оголовках свай и их соединении ростверком приведенное в табличном виде. В работе [23] Л.К. Гинзбург подверг сомнению результаты натурных и лабораторных исследований, изложенные в [24], хотя они относятся к моделированию подпорных стен, состоящих из двух рядов буронабивных свай. Авторы работы [24] оценивая арочный эффект, возникающий при определенном расстоянии между сваями в первом ряду, приходят к выводу о том, что второй ряд свай незначительно вовлекается в работу подпорной стенки. Для малосвязного грунта обратной засыпки данные о распределении активного давления между рядами свай приведены в табличном виде, а также выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

При анализе работ ряда авторов, выполненном А.Ф. Кобахидзе [25] решения разделены на две группы первая – в соответствии с решением Кулона эпюра давлений прямолинейна (треугольной) и вторая группа в которой эпюра криволинейна. Автор предположил, что это связано с условиями в нижней части клина сползания. Опыты [26] показали, что при наличии скального основания эпюра давления на подпорную стенку в нижней точке стремится к нулю и необходимо предпринимать дополнительные мероприятия по обеспечению устойчивости подпорных стен.

В продолжение методики расчета М.Н. Гольдштейна [27] в работе [28] применили вариационный метод к расчету оползневого давления на подпорные стены и разработали алгоритм аналитического расчета, а в работе [29] эти решения улучшены.

Подпорная стена набережной типа больверк с эпюрой давления по Кулону (по закону треугольника) с учетом смещения стенки разработал

В.М. Карпов [30]. Он принял гипотезу о том, что стенка поворачивается относительно точки закрепления (анкера). Решение получено для упругой среды, а для исключения разрыва сплошности согласно М.И. Горбунова-Посадова [31] вводит специальный коэффициент. В статье приведено сравнение теоретического смещения и наблюдаемое в натуре.

Опыты с плоскопараллельным перемещением металлической стенки с погруженной в песчаные и глинистые грунты описаны в [32]. Авторами изучены размеры и форма тел выпирания грунта, по которым определялись сцепление и угол внутреннего трения, а затем сравнивались с полученными в приборе одноплоскостного среза. Однако размеры моделей позволяют оценить сопротивление грунта сдвигу только в первом приближении.

В работах Ю.Б. Михайлова [33, 34] разработан метод определения активного и пассивного давления на подпорные стенки от ступенчатых и ступенчато-возрастающих нагрузок при ломанном очертании поверхности обратной засыпки. Решения получены для невесомой среды с использованием линий разрыва. Из множества возможных решений выбираются те при которых активное давление максимально, а пассивное давление – минимально. Автор выполнил сравнение результатов расчета с расчетом по методикам других авторов [8] и графоаналитическим методом С.С. Голушкевича [35], который учитывает вес при определении давления на подпорную стенку. Разработанный Ю.Б. Михайловым метод служит основой для разработки на его основе численных методов.

О.Л. Рудых в работе [36] предложил методику использования МКЭ для определения давления грунта на подпорные стены и определения НДС засыпки. Им предложено кривые деформирования, полученные в стабилометрах, аппроксимировать гиперболой, а для описания предельного состояния грунта использовать критерий Кулона-Мора. Для решения упругопластической задачи использован метод переменных параметров в сочетании с методом последовательных приближений. На

первом шаге получают поле перемещений внутри массива грунта по результатам упругого решения. Это позволяет получить в центрах КЭ главные напряжения и их интенсивность. Затем уточняют характеристики грунта и расчет повторяется до получения удовлетворительной сходимости результатов последних двух шагов приближения. Граничные условия задаются в перемещениях, что облегчает формирование матрицы жесткости.

В работе [37] Ф.Я. Новиков вначале приводит общие вопросы возведения подпорных стен для вечномёрзлых грунтов, а затем предлагает метод расчета распорного давления [38] при сезонном оттаивании грунта.

Вопрос математической оптимизации уголковой подпорной стены с анкером по критерию стоимости рассмотрен в [39], что позволяет получить экономию материала до 15 %.

Н.Ф. Какосимиди получил реактивные давления основания и изгибающие моменты в полосе погруженной в упругоползучее основание [40], которое может быть использовано при расчете шпунтовых ограждений, фундаментных стенок, бойверков и др. на конкретном примере показана важность учета реологических процессов в грунте основания.

Отдельный класс работ посвящен использованию буронабивных свай в противооползневых сооружениях [41 - 44] в которых предложены четыре этапа проектирования таких сооружений включающие оценку устойчивости оползневого участка, комплексный расчет удерживающего сооружения, конструирование железобетонных элементов сооружения и выпуск итоговых документов [41].

Проведенные в последние годы обследования ряда подпорных сооружений различного назначения [45, 46] показали, что дефекты подпорных сооружений имеют общие причины возникновения, что позволяет сформулировать принципы совершенствования методов их расчета. В соответствии с международным пониманием геотехнических

проблем [47] формулирование принципов расчета подпорных стен для обеспечения безопасности их эксплуатации и долговечности по-прежнему является актуальной задачей.

По аналогии со стандартом [47] целесообразно рассматривать следующие предельные состояния:

- общая потеря устойчивости;
- разрушение структурных элементов, на пример стены, анкера, обвязочного пояса или подпорки, или разрушение соединения между такими элементами;
- комбинированное разрушение в грунте основания и в элементах структуры;
- разрушение под действием гидравлического вспучивания или размывания;
- перемещение удерживающей структуры, которое может вызвать обвал или нарушить эффективное использование структуры или соседних строений, опирающихся на нее;
- недопустимая фильтрация воды через или под стеной;
- недопустимый перенос частиц грунта через или под стеной;
- недопустимое изменение режима грунтовых вод.

Такой подробный подход и детализация предельных состояний не противоречит российским нормам и согласуется с основными принципами проектирования подпорных сооружений [48].

В заключение отметим, что использование метода предельного напряженного состояния дают более точные решения по величине давления на подпорные стенки, чем методы использующие плоские поверхности скольжения по Кулону.

Список цитируемой литературы

1. Снитко Н.К. Определение бокового давления сыпучего тела с учетом сдвига стенки и клина сползания // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 1971, с. 1-3.
2. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стен.- Л.: Госстройиздат, - 1963, 295 с.
3. Шихиев Ф.М., Яковлев П.И. Активное давление разнослойной засыпки на подпорную стенку // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1975, с. 24-26
4. Яковлев П.И. Экспериментальные исследования давления грунта на стенки с двумя разгружающими плитами при разрывных нагрузках на засыпке // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, 1974, с. 7-9.
5. Шихиев Ф.М., Варгин М.Н. О критических смещениях ограждений, приводящих к предельному состоянию в засыпке // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, 1971, с. 3-5
6. Шихиев Ф.М. Кинематическая теория давления грунтов на причальные сооружения и другие типы жестких и гибких ограждений. Автореферт докт. дисс. Ленинград.- 1965, 45 с.
7. Яковлев П.И. Исследование некоторых способов уменьшения давления грунта на подпорные стенки и причальные сооружения. Автореферат канд. дисс., Одесса, 1964, 20 с.
8. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен. М.: Высшая школа.- 1964, 196 с.
9. Цагарели З.В. Новые облегченные конструкции подпорных стен. М.: Стройиздат.- 1969, 208 с.
10. Прокофьев И.П. Давление сыпучего тела и расчет подпорных стенок, М.: Стройиздат.- 1947, 144 с.
11. Клейн Г.К., Караваев В.Н. Статистический подход к выбору оптимальных размеров подпорных стен // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, 1971, с. 1-3.
12. Варгин М.Н. Действие сплошной нагрузки на подпорную стенку // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, 1968, с. 8-10.
13. Бугров А.К. О давлении несвязного грунта на жесткую стенку с учетом ее перемещений // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 1980, с. 5-8.
14. Зархи А.З. Экспериментальные исследования распределения реактивных давлений грунта на шпунтовую стенку и одиночную сваю при действии горизонтальной силы // Тр. ЛИИВТ, вып. XXI, 1954.
15. Будин А.Я., Гуринский М.А. Расчет пружинных компенсаторов для грунтовых анкеров // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1985, с. 11-13.
16. Пат. № 1222757 Анкерная тяга подпорной стенки / Перлей Е.М., Будин А.Я., Гуринский М.А. Завл. № 3808670/29-33 от 06.11.1984. Опубл. 07.04.1986. Бюл. № 13
17. Будин А.Я. Тонкие подпорные стенки. Л.: Стройиздат, 1974, 208 с.

18. Сорочан Е.А., Рябова М.С. Давление набухающего грунта на подпорные стенки // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, 1988, с. 9-11.
19. Сорочан Е.А., Кривонос Ю.Ф. Влияние горизонтального давления на здания и сооружения при набухании грунта // Промышленное строительство.- 1972.- № 5.- с. 18-20.
20. Гинзбург Л.К. Особенности устройства подпорных стен на оползневых участках // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, 1989, с. 3-5
21. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции.- М.: Стройиздат, 1979.- 80 с.
22. Гинзбург Л.К., Коваль В.Е., Лапкин В.Б., Васковская В.С. Распределение усилий между рядами свай противооползневой конструкции // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1990, с. 7-11.
23. Гинзбург Л.К. О распределении давления грунта между рядами свай // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1985, с. 28.
24. Карасев О.В., Берман В.И., Цесарский А.А. Экспериментальные исследования двухрядных подпорных стен из буронабивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1983, с. 9-11.
25. Кобахидзе А.Ф. К вопросу о форме эпюры давлений засыпки на подпорную стенку // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, 1977, с. 37-40.
26. Игнатов В.И., Быков Е.Н., Шулев А.С. О распределении давления засыпки на подпорную стенку // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1973, с. 41-43.
27. Гольдштейн, М.И., Дорфман А.Г., Дудинцева И.Л. Применение вариационного метода к расчету давления грунта на подпорные стены // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 1969, с. 6-8.
28. Дорфман А.Г., Дудинцева И.Л. Применение вариационного метода к расчету оползневой нагрузки на подпорные стены // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1971, с. 36-38.
29. Сахновский А.М. Давление несвязного грунта на подпорные стены. Автореф. канд. техн. наук.- Днепропетровск.- 1984, 20 с.
30. Карпов В.М. Расчет смещений набережных типа больверк, проектируемых по схеме свободного опирания // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1972, с. 27-29
31. Огранович А.Б., Горбунов-Посадов М.И. Расчет фундаментной стенки на горизонтальную нагрузку с учетом разрыва сплошности основания // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3, 1966, с. 27-29.
32. Черкасов И.И., Байтурсунова Н.З. Деформация поверхности грунта при смещении заделанной в него тонкой стенки // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1972, с. 31-33.

33. Михайлов Ю.Б. Давление грунта на подпорные стенки от ступенчатых нагрузок // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 1975, с. 23-26
34. Михайлов Ю.Б. Решения для сложных случаев загрузки подпорных стен // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1988, с. 21-24
35. Голушкевич С.С. Статика предельных состояний грунтовых масс.- м.: Гостехиздат, 1957, 288 с.
36. Рудых О.Л. Использование МКЭ для определения давления грунта засыпки на подпорные стены // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1981, с. 20-22
37. Новиков Ф.Я. Тонкие подпорные стенки для вечномерзлых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, 1978, с. 20-22.
38. Новиков Ф.Я. Расчет распорного давления грунта на подпорную стенку, возводимую на вечномерзлых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 4, 1980, с. 14-18
39. Почтман Ю.М., Жмуро О.М., Ланда М.Ш. Проектирование оптимальной подпорной стенки с анкерной тягой // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1978, с.17-18
40. Какосимиди Н.Ф. Расчет фундаментной стенки, заглубленной в упругоползучее основание // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1989, с. 23-24
41. Семенов О.Г. определение критического расстояния между элементами удерживающего сооружения оползневых склонов // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1989, с. 11-12
42. Семенов О.Г. определение критического расстояния между элементами удерживающего сооружения оползневых склонов // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 6, 1989, с. 11-12
43. Митурский С.Н., Грицюк Л.В. Использование буронабивных свай в противооползневых сооружениях // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1973, с. 20-22.
44. Деревенец Ф.Н. Взаимодействие оползневого грунта со сваями с учетом конфигурации удерживающего сооружения. Автореф. дисс. канд. наук.- Краснодар.- 2006, 20 с.
45. Евтушенко С.И. Результаты обследования и оценка технического состояния подпорной стены Потаповского карьера в х. Верхний Потапов / С. И. Евтушенко, А. В. Рыжов // Строительство - 2006 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. строит. ун-т. - Ростов н/Д : РГСУ, 2006. - [Ч. 2]. - С. 175-176.
46. Евтушенко С.И. Анализ состояния подпорной стены в районе общежития № 4 НГТУ и заключение о возможности ее дальнейшей эксплуатации // Строительство - 1998 : тезисы доклада Междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. строит. ун-т. - Ростов н/Д : РГСУ, 1998. - С. 136-137.

47. ТКП EN 1997-1-2009 Еврокод 7 «Геотехническое проектирование», Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск, 2010.
48. Проектирование подпорной стены на границе участков по адресу сп. Мастерской в г. Новочеркасске / С. И. Евтушенко, Т. А. Крахмальный, А. В. Рыжов // Строительство - 2006 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Рост. гос. строит. ун-т. - Ростов н/Д : РГСУ, 2006. - [Ч. 2]. - С. 167-168.