

*Р.И. Шенкман, аспирант, А.Б. Пономарев, д.т.н., профессор
Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

ПРИМЕНЕНИЕ ГРУНТОВЫХ СВАЙ В ОБОЛОЧКЕ ИЗ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ГОРОДА ПЕРМИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены проблема эффективности применения грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в геологических условиях города Перми Российской Федерации, возможности проектирования подобных конструкций в рамках существующей нормативной литературы. Представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с определением критериев прочности геосинтетических материалов, а также направления дальнейших исследований научной работы.

Ключевые слова: *грунтовые сваи, геосинтетическая оболочка, экспериментальные исследования.*

*Р.І. Шенкман, аспірант, А.Б. Пономарьов, д.т.н., професор
Пермський національний дослідницький політехнічний університет*

ЗАСТОСУВАННЯ ГРУНТОВИХ ПАЛЬ В ОБОЛОНЦІ З ГЕОСИНТЕТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ У ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ МІСТА ПЕРМІ РОСІЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

Розглянуто проблема ефективності застосування ґрунтових паль в оболонці з геосинтетичних матеріалів у геологічних умовах міста Пермі Російської Федерації, можливості проектування подібних конструкцій у рамках існуючої нормативної літератури. Представлено результати експериментальних досліджень, пов'язаних з визначенням критерію міцності геосинтетичних матеріалів, а також напрями подальших досліджень наукової роботи.

Ключові слова: *ґрунтові палі, геосинтетична оболонка, експериментальні дослідження.*

*R. Shenkman, PhD student
A. Ponomaryov, Prof., Doctor of Technical Sciences
Perm National Research Polytechnic University*

APPLICATION OF GEOTEXTILE ENCASED PILES IN GEOLOGICAL CONDITIONS OF PERM FOR CONSTRUCTION OF BUILDING FOUNDATIONS

Article deals with issues related to problem of the applying of geotextile encased piles in the geological conditions of Perm region, the possibility of designing such structures within the existing normative literature. The article presents results of experimental studies related to the definition of criteria for the strength of geosynthetic materials.

Keywords: *soil piles, gotextile cover, experimental research.*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами. Пермский край – не самый благоприятный для строительства регион России с геологической точки зрения, поскольку на его территории встречается большое количество участков со слабыми грунтами основания, например, поймы рек,

торфяники, болота. Развитие экономики края заставляет осваивать эти территории, в том числе для возведения временных зданий и сооружений при разработке полезных ископаемых. Использование грунтовых свай для улучшения слабых оснований является не новым способом, во многом доказавшим свою эффективность при строительстве насыпей. Данный метод позволяет значительно снизить осадки и повысить несущую способность грунтов, в то же время он является механическим, а следовательно, наиболее эффективным в глинистых грунтах, которые преобладают на территории Пермского края. Применение современных геосинтетических материалов позволяет значительно повысить эксплуатационные качества данного типа конструкции, а также избежать характерных для них недостатков, связанных с постоянством геометрий поперечного сечения свай, как во время производства, так и эксплуатации грунтовых свай. Совокупность всех этих причин создает значительную актуальность применения грунтовых свай для улучшения слабых грунтов на территории Пермского края.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Существует значительное количество исследований, подтверждающих эффективность грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов, выполненных такими учеными, как С.М. Кислов, А.Н. Краев, А.Б. Пономарев, J. Gniel, A. Paul, H. Kempfert, U. Trunk и др. [1 – 3, 5 – 10].

По результатам данных исследований было определено, что применением данных конструкций можно добиться снижения осадок основания до 60%, повысить экономическую эффективность строительства фундаментов на 30% и т.д. Также некоторыми исследованиями проводилось сравнение эффективности различных вариантов заполнения и обертывания грунтовых свай. По результатам данных исследований наиболее эффективными были признаны так называемые каменные колонны или грунтовые свай в оболочке из прочных высокомодульных геосинтетических материалов с заполнением щебнем или похожим материалом. Данный вид конструкций способен воспринимать нагрузку до 500 кН (при испытаниях в натуральную величину), и это без учета действия окружающего грунта, повышающего несущую способность грунтовой свай. При этом наибольшую эффективность имеют конструкции, выполненные по схеме свай-стоек. Практически все исследования сходятся к одной модели расчета основания, улучшенного грунтовыми сваями, заключающейся в выделении элементарного участка грунтового основания (свай и ее окружающего грунта) и рассмотрении уравнения предельного равновесия сил, действующих на данном участке: вертикальная нагрузка на сваю и межсвайное пространство, растягивающее усилие в геосинтетическом материале, боковое давления грунта свай и окружающего массива грунта. Наиболее полно методика расчета основания насыпи улучшенного грунтовыми сваями в оболочке из геосинтетического материала представлена в учебнике Н. Kempfer [5]. Согласно этой модели при передаче на основание вертикальной нагрузки в материале заполнения свай возникает вертикальное напряжение, равномерно распределенное по сечению, и боковое давление, равномерно распределённое по поверхности оболочки грунтовой свай. Удерживающими усилиями при этом являются пассивное действие окружающего грунта, растягивающее усилие в геосинтетическом материале. Боковое давление определяется в зависимости от величины вертикального через коэффициент бокового давления ξ , представленный в классической механике грунтов и определяемый по формуле (1)

$$\xi = tg^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

В тоже время данный коэффициент плохо согласуется с экспериментальными данными по его определению для конструкций с высокими замкнутыми стенками, которой, по сути, является грунтовая свая.

Выделение не решенных прежде частей общей проблемы, которым посвящается статья. Вопрос применения грунтовых свай остается слабо изученным в России и следовательно сложно применимым в рамках существующей жесткой и в то же время устаревшей нормативной базы. По существующим регламентирующим документам данный тип усиления можно рассматривать как отдельные сваи, т.е. находить несущую способность отдельной грунтовой сваи, которая может быть определена по сумме несущих способностей острия и боковой поверхности (сил трения). Методика определения данной несущей способности основана на большом количестве эмпирических коэффициентов, применение которых требует дополнительных экспериментальных исследований. Также известны различные гипотезы расчета в зависимости от технологии изготовления грунтовой сваи, т.е. как буровой или сваи вдавливания (разное значение сопротивления по боковой поверхности), которые также будут влиять и на грунтовую сваю. Несущая способность отдельной сваи является важным вопросом, но в соответствии с нормами основным является расчет по деформациям, точное определение которых возможно лишь с применением программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Применение компьютерного моделирования в инженерной практике возможно лишь с разработкой моделей, адекватно отражающих работу реальной конструкции; следовательно, требуются значительное количество исследований для их разработки.

Постановка задач. В большинстве случаев применение грунтовых свай связано со строительством насыпей на слабых основаниях. С нашей точки зрения, интересным является применение данных свай для непосредственного возведения фундаментов промышленных и гражданских зданий.

Поскольку грунтовые сваи предполагается использовать под фундаменты различных сооружений, что подразумевает передачу на них значительных нагрузок, возникает вопрос выбора используемого геосинтетического материала. Конечно, существует большое количество требований к геосинтетикам, связанных с размером частиц заполнителя, дренажными свойствами, технологией изготовления, но основным является его прочность, поскольку грунтовые сваи – это деформируемые системы, жесткость которых обеспечивается материалом геосинтетической оболочки. При использовании данных свай в слабых грунтах он будет воспринимать значительную нагрузку. Исследованию прочности оболочек грунтовых свай было решено посвятить основную часть нашей работы.

Как уже было сказано выше, наиболее эффективным способом применения данной технологии является устройство грунтовых свай по схеме сваи-стойки, т.е. с опиранием на малосжимаемые несущие грунты. Если проанализировать напряженное состояние грунтовой сваи в реальных условиях работы, т.е. глинистые грунты, обладающие сцеплением, можно сделать вывод о том, что работать данная конструкция как классическая свая-стойка не будет. Поскольку при работе грунтовой сваи присутствуют вертикальные деформации, связанные с уплотнением материала заполнения и деформированием поперечного сечения сваи (в отличие от железобетонной сваи), то будут действовать силы трения по боковой поверхности грунтовой сваи, уменьшая величину вертикальных напряжений в теле сваи с глубиной. То есть часть нагрузки грунтовая свая будет воспринимать боковой поверхностью независимо от схемы ее работы, величина же данных усилий будет во многом зависеть от условий контакта сваи с окружающим грунтом, боковое давление в реальных условиях работы конструкции распределяется неравномерно по высоте грунтовой сваи,

в отличие от математической модели, представленной в литературе. Работа грунтовой сваи по схеме стойки возможна лишь в грунтах с величиной удельного сцепления, близкой к нулю.

Таким образом, из всего вышеперечисленного были сформулированы **основные направления исследования**:

- определение соответствия существующих методик расчета планируемому применению грунтовых свай, а так же их реальной работы;
- возможность применения грунтовых свай для определения критериев прочности, применяемого геосинтетического материала;
- определение наиболее точного метода моделирования и расчета грунтовой сваи в оболочке из геосинтетического материала.

Для этих целей было решено провести серию экспериментов, а также численное моделирование с использованием программного комплекса Plaxis.

Изложение основного материала исследования. Для изучения напряженно-деформированного состояния геосинтетической оболочки грунтовой сваи было проведено ряд экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования были разбиты на два этапа. На первом этапе проведены экспериментальные исследования упрощенной модели работы грунтовой сваи – без учета действия окружающего грунта. На данном этапе проверялось основное условие представленной выше расчетной модели улучшенного основания, связанное с распределением бокового давления по высоте грунтовой сваи (зависимость от коэффициента бокового давления). На втором этапе исследований проведены испытания маломасштабных моделей грунтовых свай с учетом действия окружающего грунта.

Эксперименты выполнялись на маломасштабных моделях грунтовых свай. Для экспериментальных исследований были изготовлены модели грунтовой сваи из мелкозернистого однородного песка, обернутого различными геосинтетическими материалами. Физико-механические характеристики песка получены в результате лабораторных исследований. В качестве материала обертывания использовался дорнит нетканый иглопробивной.



Рисунок 1 – Схема эксперимента

Математическое описание эксперимента было составлено на основе наиболее распространённой аналитической модели расчета улучшенных оснований. По данной модели при вертикальном нагружении сваи на оболочку оказывается равномерно распределённое давление, определяемое через коэффициент бокового давления ξ , значение растягивающих усилий в оболочке из геосинтетика в дальнейшем легко определить по теории расчета тонкостенных цилиндрических оболочек. Теоретическая схема эксперимента представлена на рис. 1.

Важной частью опыта было точное определение характеристик материала оболочки. Для этих целей проводились дополнительные лабораторные испытания на разрыв образцов используемого геосинтетического материала с построением диаграмм испытаний материала на разрыв. По данным диаграммам впоследствии определялись действующие в оболочке растягивающие усилия, соответствующие замеренным значениям относительных радиальных деформаций сечения грунтовой сваи. Испытательный стенд с установленной грунтовой свайей представлен на рис. 2.

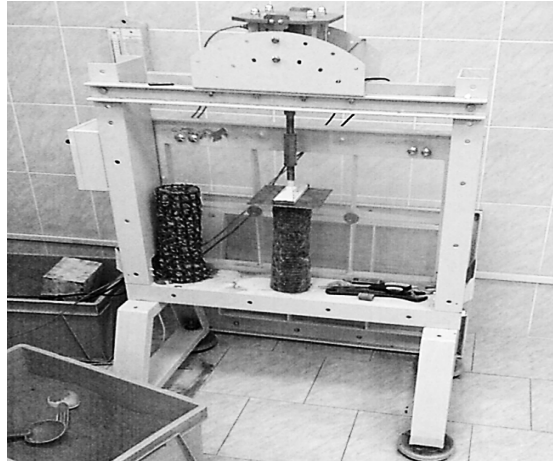


Рисунок 2 – Испытательный стенд с установленной в него масштабной моделью грунтовой сваи

В процессе проведения эксперимента проводились замеры геометрических размеров поперечных сечений сваи в разных точках по ее длине. В соответствии с замерами определялись относительные радиальные деформации поперечного сечения (рис. 3).

Затем было выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований с данными вычислений, выполненных по представленной выше аналитической модели. В соответствии с полученными данными испытаний, радиальные деформации по высоте грунтовой сваи далеки от равномерных. Анализ экспериментальных данных показал, что отклонения растягивающих усилий в оболочке ниже вычисленных по аналитической модели на 35% в случае средних значений, на 13% – для максимальных. Данный факт говорит о значительной неравномерности растягивающих усилий, действующих в геосинтетической оболочке и связанной со сложным напряженным состоянием оболочки, неравномерностью плотности материала заполнения. Эти же факторы могут влиять на работу реальных грунтовых свай.

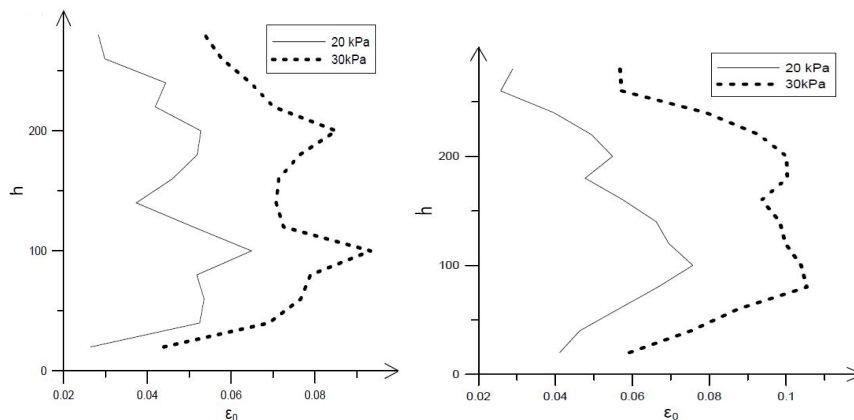


Рисунок 3 – Распределение относительных радиальных деформаций сечения грунтовой сваи при различном значении внешней нагрузки по высоте: ϵ_0 – относительные радиальные деформации, h – высота модели грунтовой сваи

Поскольку в реальных условиях предполагается использовать грунтовые сваи из щебня, следует отметить, что в представленном эксперименте не учитывались высокие контактные напряжения на границе материала заполнения и геосинтетической оболочки. Это явление связано с формой зерен щебня и было исследовано в работах *Joel Gniel* [6].

Схемы эксперимента с учетом действия окружающего грунта представлены на рис. 4. Общий вид стенда – на рис. 5.

Нагружение маломасштабной модели происходило через жесткую пластину с выдерживанием каждой ступени нагрузки до условной стабилизации деформации. Наиболее опасным сечением в данных условиях будет являться сечение, непосредственно находящееся под грузовым штампом, так как в нем отсутствует действие окружающего грунта. Критерием разрушения оболочки являлось резкое нарастание деформаций штампа. В соответствии с данными аналитических расчетов разрыв оболочки грунтовой сваи должен произойти при нагрузке в 695 кПа ($213,36 \text{ кН/м}^2$ бокового давления), по данным экспериментальных испытаний разрушение образца произошло при вертикальной нагрузке в 750 кПа на глубине 50 мм. С учетом действия окружающего грунта (по методу суперпозиции) боковое давление на данном участке равно 227 кН/м^2 , что выше аналитического решения на 7%. Значение напряжений в голове и острие сваи на каждом этапе загрузки отличались менее чем на 5%, следовательно, в данных условиях маломасштабная модель работала по схеме сваи-стойки. Таким образом, в соответствии с теоретической моделью боковое давление должно равномерно распределяться по высоте масштабной модели грунтовой сваи, что, по мнению авторов, не соответствует реальной работе конструкции.

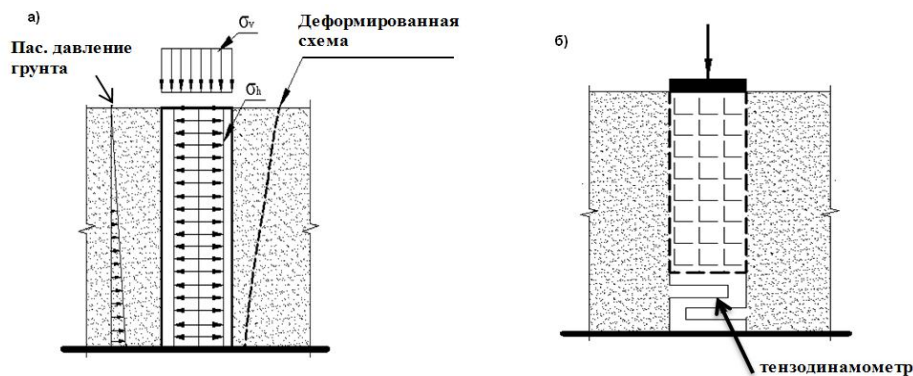


Рисунок 4 – Схемы эксперимента второго этапа:
а – теоретическая; б – схема нагружения

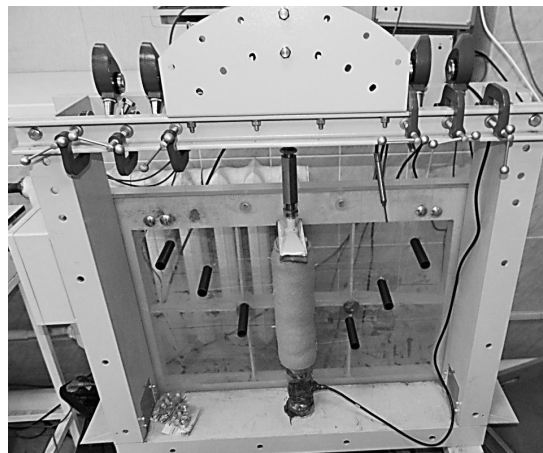


Рисунок 5 – Стенд с установленной в него для испытаний

масштабной моделью грунтовой сваи

Далее в процессе исследования было проведено численное моделирование тестовых задач с применением программного комплекса Plaxis. Целью данного моделирования являлось определение эффективности применения грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в качестве метода улучшения слабого основания в геологических условиях города Перми, а также определения напряженно-деформированного состояния грунтовой сваи, его соответствия основным существующим расчетным моделям.

Описание геологических условий г. Перми, использованных при численном моделировании, сделано на примерах конкретных геологических изысканий, а так же архивных данных изыскательских организаций и представлено в таблице 1 [4].

Таблица 1 – Физико-механические характеристики инженерно-геологических элементов IV надпойменной террасы

ИГЭ	Наименование грунта	Мощность слоя (м)	Характеристики грунта			
			Число пластичности (д.ед.)	Удельное сцепление (кПа)	Угол внутреннего трения (град)	Модуль деформации (МПа)
1	Суглинок аллювиальный от полутвердой до текучепластичной консистенции	6 – 13	0,15 – 0,22	9 – 25	18 – 24	5 – 14
2	Гравийный грунт с песчаным заполнителем	0,3 – 4	–	0 – 1,2	30 – 44	20 – 38
3	Грунты верхнепермского возраста: аргиллит	–	–	100	19 – 24	52 – 58

Для постановки тестовых примеров было принято решение рассмотреть плоскую осесимметричную задачу с использованием упругопластической модели грунта Мора – Кулона. Для сравнения эффективности принятых решений были рассмотрены модели фундамента на естественном основании и с грунтовой свайей с применением геосинтетической оболочки и без нее (рис. 6).

При анализе представленных полей напряжений можно сделать некоторые выводы о напряженном состоянии грунтовой сваи. Одним из наиболее важных будет являться наличие рассеивания напряжений, то есть снижение вертикальных напряжений с глубиной, осуществляемое за счет сил трения, возникающих при вертикальной деформации грунтовой сваи, а также деформаций поперечного сечения. Эпюра распределения вертикальных напряжений по глубине грунтовой сваи, а также растягивающих усилий в геосинтетической оболочке, представлена на рис. 8 и 9.

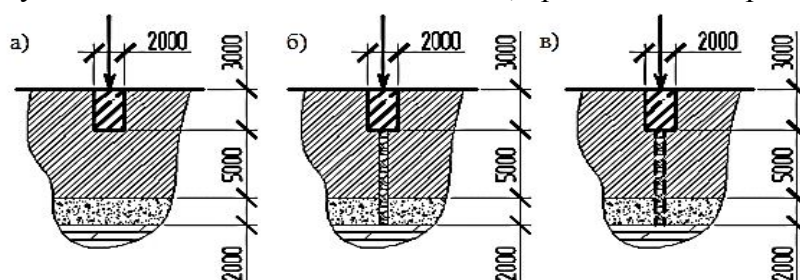


Рисунок 6 – Модели тестовых задач: а – фундамент на естественном основании, б – грунтовая свая без геосинтетической оболочки; в – с использованием геосинтетической оболочки

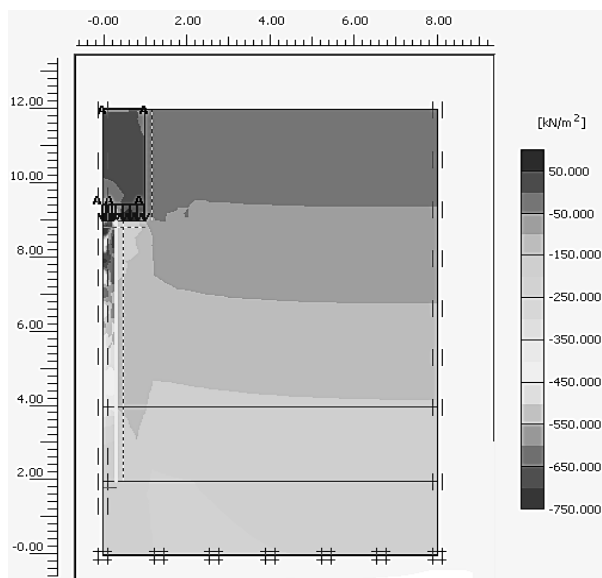


Рисунок 7 – Поля вертикальных напряжений в массиве грунта с использованием грунтовой сваи в оболочке

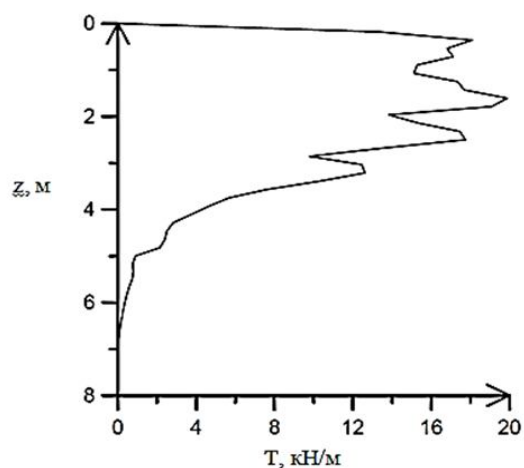


Рисунок 8 – Эюра распределения растягивающих усилий (T , кН/м) в оболочке из геосинтетического материала по глубине грунтовой сваи (z , м)

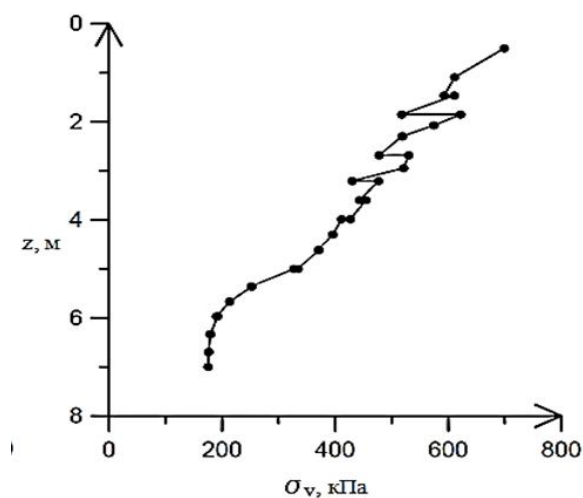


Рисунок 9 – Эюра распределения вертикальных напряжений (σ_v , м) по глубине грунтовой сваи (z , м)

По результатам численного моделирования были построены графики зависимости осадки фундамента на различных типах основания: естественном (без улучшения), улучшенном каменной колонной без применения геосинтетических материалов, улучшенном с применением геосинтетических материалов разной жесткости. Данные графики представлены на рис. 10 и демонстрируют эффективность применения грунтовых свай в данных геологических условиях.

При постановке тестовой задачи были использованы геосинтетические материалы трех различных погонных жесткостей 500 кН/м, 1000 кН/м и 1500 кН/м, соответственно геос.1, геос.2, и геос.3 в обозначениях на рис. 10. Из представленных данных видно, что увеличение жесткости геосинтетической оболочки положительно сказывается на величине осадок улучшенного основания.

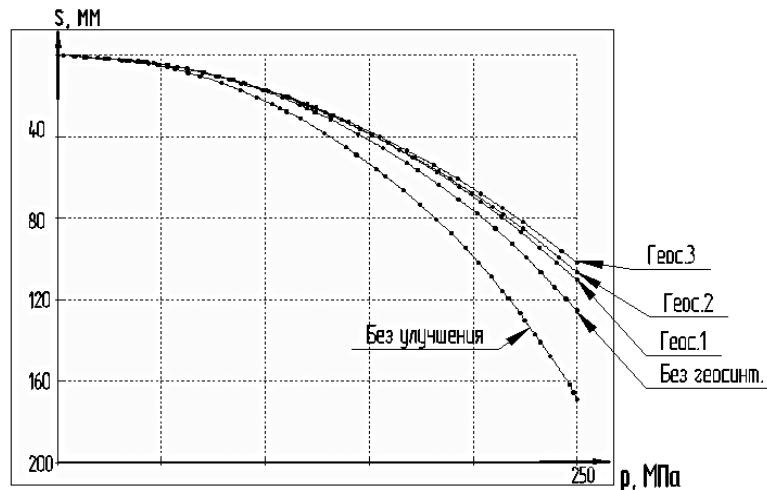


Рисунок 10 – График зависимости осадок основания от величины вертикальной нагрузки для различных типов основания

По результатам численного моделирования установлено, что при применении грунтовых свай без армирования геосинтетическим материалом эффективность снижения осадок по сравнению с неулучшенным основанием составляет 27 %, с применением геосинтетического материала жесткостью 500 кН/м (геос.1) – 38%, геосинтетического материала жесткостью 1000 кН/м (геос.2) – 42%, геосинтетического материала жесткостью 1500 кН/м (геос.3) – 46%. Результаты численного моделирования во многом соответствуют выполненному анализу напряженного состояния грунтовой оболочки.

Выводы. Научная новизна и практическое значение данного исследования заключается в доказательстве эффективности применения грунтовых свай в геосинтетической оболочке в качестве метода улучшения слабого основания в геологических условиях г. Перми.

Существующие расчетные методы недостаточно точно описывают реальную работу конструкции, но могут применяться для расчетов прочности геосинтетического материала с определенными допущениями;

Предложенный метод улучшения основания имеет значительную актуальность на территории г. Перми, геология которого представлена слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами.

Рассматриваемая тематика является недостаточно изученной как в России, так и в других странах и требует значительных дополнительных изысканий для успешного применения данного метода улучшения основания в инженерной практике.

Дальнейшие исследования в данной области авторами предполагается делать в направлении, связанном с более глубоким изучением напряженно-деформированного состояния оболочки грунтовой сваи и выработкой конкретных рекомендаций по подбору геосинтетических материалов в инженерной практике.

Литература

1. Краев, А.Н. Повышение несущей способности водонасыщенного глинистого основания за счёт внедрения песчаных армированных свай /А.Н. Краев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2008. – №4. – С. 146 – 150.
2. Пономарев, А.Б. Исследование несущей способности грунтовой колонны в оболочке из геосинтетической решетки / А.Б. Пономарев, С.М. Кислов // Материалы международной научно-практической конференции. – Архангельск, 2003.
3. Пономарев, А.Б. О некоторых инженерных подходах к расчету свай из щебня в георешетке / А.Б. Пономарев, А. Пауль // Сборник научных трудов международной конференции по механике грунтов. – Пермь, 2004. – С. 7 – 15.
4. Калошина, С.В. Оценка статического влияния вновь возводимых плитных фундаментов на дополнительную осадку зданий в условиях плотной застройки г. Перми / С.В. Калошина // Выпускная квалификационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пермь: ПГТУ, 2011.– 232 с.
5. Kempfert, H. Excavations and Foundations in Soft Soil / H. Kempfert, B. Gebreselassie. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 591с.
6. Joel Gniel. Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns / Joel Gniel, Abdelmalek Bouazza // Geotextiles and Geomembranes, 2009. – №27. – С. 167 – 175
7. Geogrid wrapped vibro stone columns / U.Trunk, G. Heerten, A. Paul, E. Reuter // Materials of eurogeo 3 conference, 2004. – С. 289 – 294
8. Jorge Castro. Deformation and consolidation around encased stone columns / Jorge Castro, Cesar Sagasetta // Geotextiles and Geomembranes, 2011. – №29. – С. 268 – 276
9. Joel Gniel. Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing / Joel Gniel, Abdelmalek Bouazza // Geotextiles and Geomembranes, 2010. – №28. – С. 108 – 118
10. Paul, A. The bearing behavior of geogrid reinforced, crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations / A. Paul, A. Ponomarev // Proceedings of the Eurogeo 3. – Munich. Volume II. – 2004. – P. 285 – 289.

Надійшла до редакції 02.10.2012
© Р.И. Шенкман, А.Б. Пономарев