

# ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. ФЕДОРЕНКО

*МИАКОМ, г. Санкт-Петербург*

Расчеты земляного полотна транспортных сооружений на слабых основаниях предполагают выполнение нескольких видов расчетов, к ним относятся: определение коэффициента устойчивости, коэффициента стабильности и коэффициента безопасности (в автодорожном строительстве). Для выполнения соответствующих расчетов применяются конкретные методики, относящиеся к инженерным и характеризующиеся определенными упрощениями и допущениями для удобства выполнения расчетов вручную. Эти методы основаны на решении плоской задачи теории упругости и теории предельного равновесия, поэтому не учитывают нелинейное поведение грунтов и одновременное существование областей допредельного и предельного равновесия.

Современные геотехнические комплексы позволяют выполнять для земляного полотна транспортных сооружений расчеты любой сложности, численное моделирование не имеет инженерных допущений и упрощений, что определяет расширенные возможности для получения полных и достоверных результатов. В статье приводится сравнение результатов общепринятых критериев инженерных методов расчета насыпей на слабом основании и численного моделирования, а также сравнение методов расчета устойчивости армированных насыпей, реализованных в различных программах.

## **Коэффициент стабильности**

Приняв за основу пример из книги проф. Г.М. Шахунянца [5] (как наиболее подробно описанный расчет), было выполнено численное моделирование рассматриваемой конструкции. Насыпь заменяется эквивалентной равномерно распределенной трапецеидальной нагрузкой,

$P=600 \text{ кН/м}^2$ . Минимальное значение коэффициента стабильности  $K_{\text{стб}}=1,17$  представляет собой область, оконтуренную изолинией со значением  $K_{\text{стб}}=1,25$ . Область располагается по оси насыпи на глубине от 15 до 30 м [5].

Результаты численного моделирования такой схемы дают очень схожие результаты и немного завышенный коэффициент стабильности (минимальное значение  $K_{\text{стб}}=1,25$ ), что объясняется невозможностью полного сопоставления двух расчетных методик (численное моделирование использует модели грунтов, соответствующие реальному поведению под нагрузкой). Область минимальных значений располагается на глубине от 5 до 30 м.

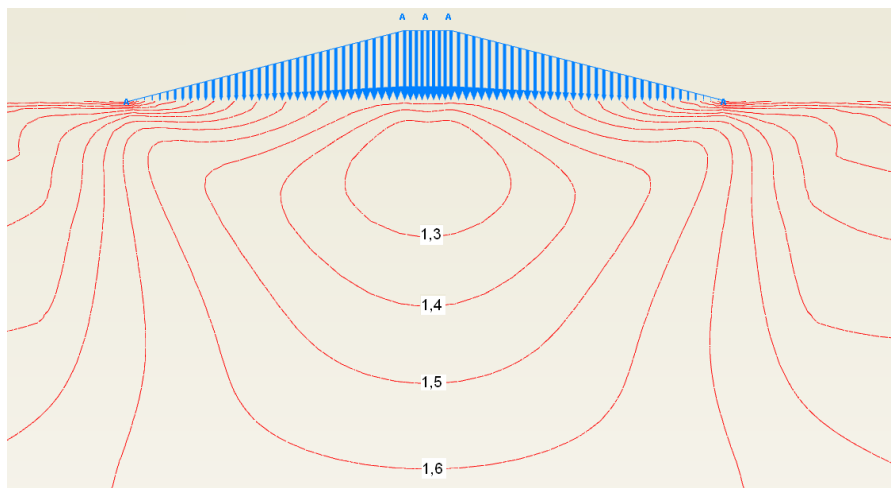


Рис. 1. Результаты численного моделирования рассматриваемого примера

Однако если отступить от допущений, принятых в инженерном расчете, и задать насыпь супесчаным грунтом, с характеристиками: удельный вес  $20 \text{ кН/м}^3$ , угол внутреннего трения  $24^\circ$ , сцепление  $19 \text{ кН/м}^2$ , то картина распределения коэффициента стабильности в основании будет совершенно иная (рис.2). Грунтовая насыпь имеет коэффициент устойчивости, близкий к критическому (Бишоп, Моргенштерн-Прайс, Спенсер, МКЭ:  $K_{\text{уст}}=1,01$ ). На рисунке 2 видно, что зоны развития пластических деформаций (справа), в которых нарушается условие прочности Кулона-Мора, хорошо согласуются с результатами расчетов

устойчивости (слева), что вполне закономерно, поскольку в основе расчета коэффициента устойчивости и коэффициента стабильности лежит одно уравнение.

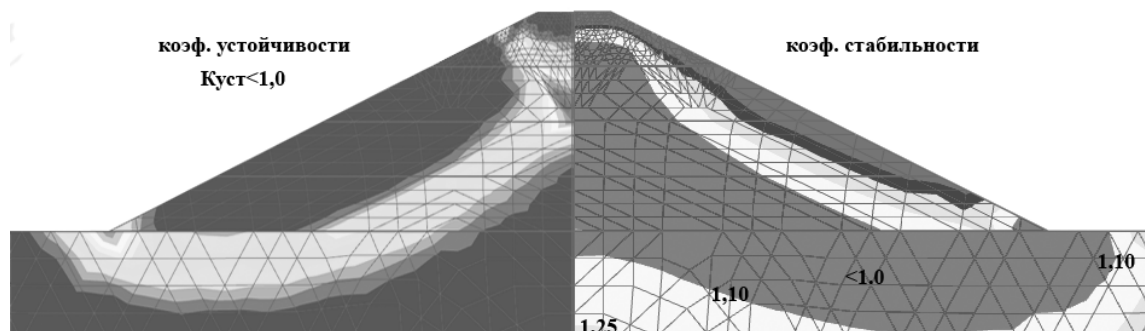


Рис. 2. Поверхность скольжения (слева); зоны коэффициента стабильности (справа)

Если моделировать насыпь из песка, с характеристиками: удельный вес 20 кН/м, угол внутреннего трения  $40^\circ$ , сцепление 3 кН/м, то устойчивость насыпи будет обеспечена  $K_{уст}=1,22$ , и развитие зон нестабильности будет иное, но сопоставимое со схемой потери устойчивости насыпи: значения  $K_{стаб}$  в основании насыпи превышают 1.

Таким образом, критерий оценки основания в виде определения  $K_{стаб}$  является аналогом коэффициента устойчивости, оба этих показателя связаны друг с другом, поскольку в основе лежит одно уравнение. Расчет коэффициента стабильности при приложении эквивалентной трапецидальной нагрузки дает некорректные результаты.

### **Коэффициент безопасности**

Согласно [3], оценка устойчивости основания земляного полотна с целью определения возможности бокового выпирания слабого грунта под воздействием нагрузки от насыпи выполняется путем определения коэффициента безопасности. Этот коэффициент представляет собой отношение несущей способности грунта к расчетной нагрузке от насыпи и используется при определении режима возведения насыпи: быстрая или медленная отсыпка.

Для иллюстрации рассматриваемого примера были выполнены расчеты с увеличением эквивалентной трапецеидальной нагрузки в 1,5 и 2 раза, а также с определением максимально возможной нагрузки на основание. В случае гибкого штампа максимальная нагрузка достигает  $2,2P$ , а если предположить, что в основании трапецеидальной нагрузки жесткий штамп, то несущая способность значительно увеличится и составит  $4,1P$ . Ни первая ни вторая схема не характерна для грунтовых сооружений.

Очевидно, что подход, основанный на определении коэффициента безопасности, не совсем корректен. Учитывая уже рассмотренный недостаток расчетов с приложением эквивалентной трапецеидальной нагрузки, безопасность основания грунтового сооружения необходимо рассматривать расчетом геотехнической системы «сооружение-основание».

### **Учет геосинтетических материалов**

Одним из широко применяемых вариантов обеспечения устойчивости насыпей, в том числе и на слабых основаниях, является использование геосинтетических армирующих материалов. Использование инженерных методов расчета таких конструкций имеет свои нюансы [1,4]. Для сравнения выполнены расчеты простого однородного откоса с армированием двумя слоями геосинтетического материала в программе с инженерным методом расчета и в геотехническом комплексе Plaxis.

Расчеты выполнялись с подбором прочности геоматериала двумя инженерными методами: Феллиниус и Бишоп, а также с использованием метода конечных элементов (МКЭ) методом снижения прочностных характеристик. Результаты представлены в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что в простом случае результаты расчетов инженерными методами и МКЭ хорошо согласуются. Принимая за требуемый коэффициент устойчивости значение  $K_{уст}=1,1$ , по

результатам подбора получено, что требуемая прочность геоматериала составляет 165 кН/м (осевая жесткость  $EA=1500$  кН/м). Однако между сравниваемыми методами есть существенная разница.

Таблица 1 Результаты сравнительных расчетов

Осевая жесткость геоматериала, кН/м (EA)	Прочность геоматериала, кН/м	Инженерные методы		МКЭ	
		$K_{уст}$ Феллиниус	$K_{уст}$ Бишоп	$K_{уст}$	Растягивающие усилия, кН/м
900	100	1,03	1,09	1,04	верхняя 57 нижняя 66
1000	110	1,05	1,11	1,05	
<b>1500</b>	<b>165</b>	<b>1,13</b>	<b>1,19</b>	<b>1,13</b>	

Принцип расчета армированных грунтовых сооружений заключается в определении долговременной прочности [2,3]: расчетные усилия, возникшие в прослойках, увеличиваются на коэффициент, учитывающий ползучесть, повреждения при укладке и влияние окружающей среды. Недостатком инженерных методов расчета устойчивости является то, что в расчет включается вся прочность материала, и нет возможности определить, не превышают ли растягивающие усилия долговременную прочность.

Согласно результатам расчета необходимо по полученной прочности 165 кН/м (которая одинаковая для верхней и нижней прослойки, что не правдоподобно), обеспечивающей устойчивость  $K_{уст}=1,13$ , определить долговременную, которая, в зависимости от условий, может быть в 2-2,5 раза больше. Таким образом, для обеспечения требуемой устойчивости необходимо заложить геоматериал с прочностью 412 кН/м. МКЭ, в аналогичном расчете, дает значения значения в верхней прослойке 56,8 кН/м; в нижней – 65,45 кН/м, геоматериал с номинальной прочностью 165 кН/м имеет длительную прочность 65,5 кН/м и может быть принят в качестве армирующего элемента.

Использование инженерных методов расчета устойчивости (программы GGU Stability; GeoStab; GEO5, GeoStudio; SlopeStability; Slide;

DCGeotex; MRE и др.) позволяет выполнять оценку сооружений с учетом армирующих прослоек, но основная проблема заключается в том, что устойчивость определяется методом сил в состоянии предельного равновесия, а МКЭ считает по деформациям и, следовательно, учитывает постепенное растяжение геоматериала и влияние его жесткости на перемещения грунта (устойчивость). Результаты, полученные по МКЭ, позволяют проверять, какие растягивающие усилия возникли в прослойке и сравнивать их с длительной прочностью, а также оценивать линейность/нелинейность работы прослойки.

### **Заключение**

Геотехническое (численное) моделирование представляет собой мощный инструмент для анализа работы сооружения. Используя общепринятые и устоявшиеся критерии оценки можно по-новому взглянуть на результаты и получить полную и логически увязанную картину. Отсутствие допущений и упрощений дает возможность решать задачи любой сложности, при этом следует учитывать, что такой инструмент должен находиться в руках компетентного специалиста (инженера-геотехника).

### **Список литературы**

1. Геотехническое обеспечение применения геосинтетических материалов в конструкциях на слабых основаниях. Дорожная держава, №45 2013.
2. ОДМ 218.5.003-2010 Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог. М.: Росавтодор, 2010.
3. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М., 2004.
4. Рекомендации по применению геосинтетических материалов в конструкциях промышленных дорог. СПб.:Миакон, 2013
5. Шахуняц Г.М. Земляное полотно железных дорог. М.:Госжелдориздат, 1953. – 827 с.