

## Аргументы в пользу трехмерного геотехнического анализа



Представляем вниманию читателей перевод заметок Мюррея Фредлунда о преимуществах трехмерного геотехнического анализа [1]. Этот автор получил образование в Университете Саскачевана и в Аграрно-техническом университете Техаса (США). У него более 50 научных публикаций по проектированию баз данных, геотехническому анализу, 3D-моделированию и системам, основанным на информации о неводонасыщенных грунтах. В 1997 году он основал компанию SoilVision, начав с разработки программного обеспечения баз данных SoilVision, которое можно было использовать для оценки поведения неводонасыщенных грунтов. Затем Фредлунд руководил разработкой восьми других программных комплексов, основанных на методах конечных элементов и предельного равновесия (теперь эти пакеты программ используются более чем в 100 странах). Сейчас он является старшим стратегическим консультантом по геотехнике в компании Bentley Systems, где руководит направлениями по улучшению совместимости программных средств, по повышению эффективности цифровых рабочих процессов и по обеспечению надежных вычислений в самой современной практике управления данными. Следует отметить, что компания Bentley Systems является ведущим мировым разработчиком и поставщиком программного обеспечения в сферах развития проектирования, строительства и эксплуатации инфраструктурных объектов и «гордится расширением своего геотехнического портфолио за счет приобретения компаний Keynetix, PLAXIS и SoilVision, вместе с которыми помогает инженерам играть важную роль в обеспечении безопасности инфраструктуры».

Перевод выполнен при поддержке партнера журнала «ГеоИнфо» – представительства компании Bentley Systems в России и СНГ.



## Фридлунд Мюррей (Fredlund Murray)

Старший стратегический консультант по геотехнике в компании Bentley Systems, доктор наук

### Почему именно 3D-анализ?

В современных требованиях к инфраструктуре на первый план выходят геотехнические соображения. Поскольку объекты инфраструктурного строительства критически связаны с подповерхностными условиями, они бывают подвержены геотехническим рискам.

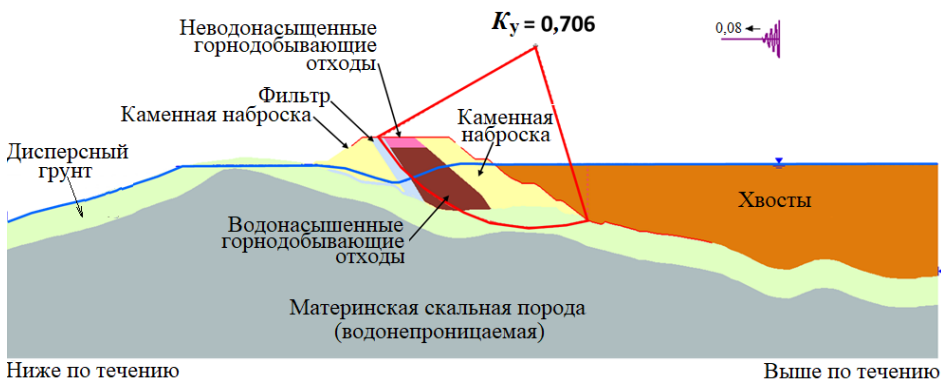
В геотехническом сообществе постоянно ведутся дискуссии о необходимости проведения трехмерного анализа. Поднимаемые в связи с этим вопросы касаются результатов, достигнутых при выполнении 3D-анализа, по сравнению с итогами традиционного 2D-анализа. И хотя в отрасли в качестве общепринятого практического метода в основном используют 2D-подход, ответы на ряд важных вопросов все еще не получены и требуют решения. Приведем некоторые из них.

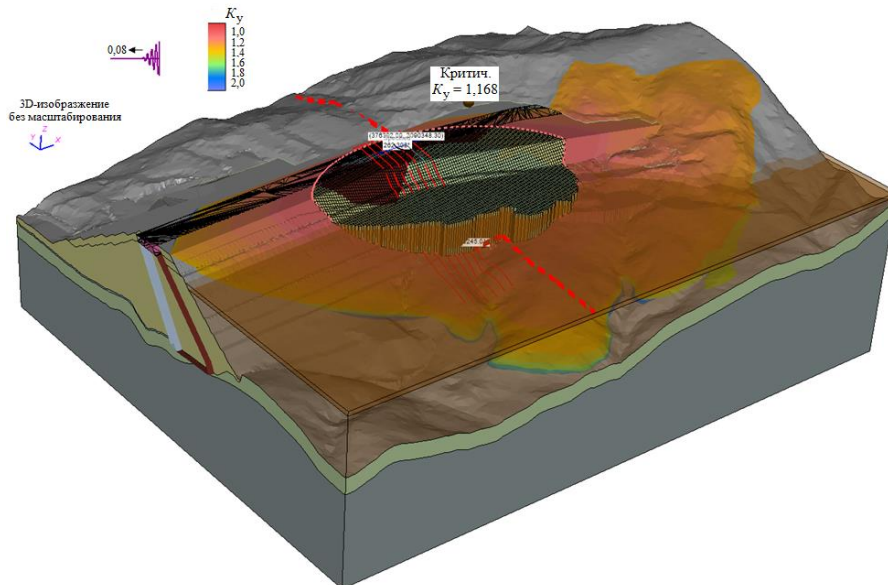
- Есть ли разница в результатах расчетов коэффициента устойчивости ( $K_y$ ) в 3D и в 2D?
- В чем преимущества 3D-анализа?
- Каковы практические отличия при использовании 3D-анализа устойчивости откосов?
- В каких случаях лучше использовать 3D-анализ?

### Истинный коэффициент устойчивости

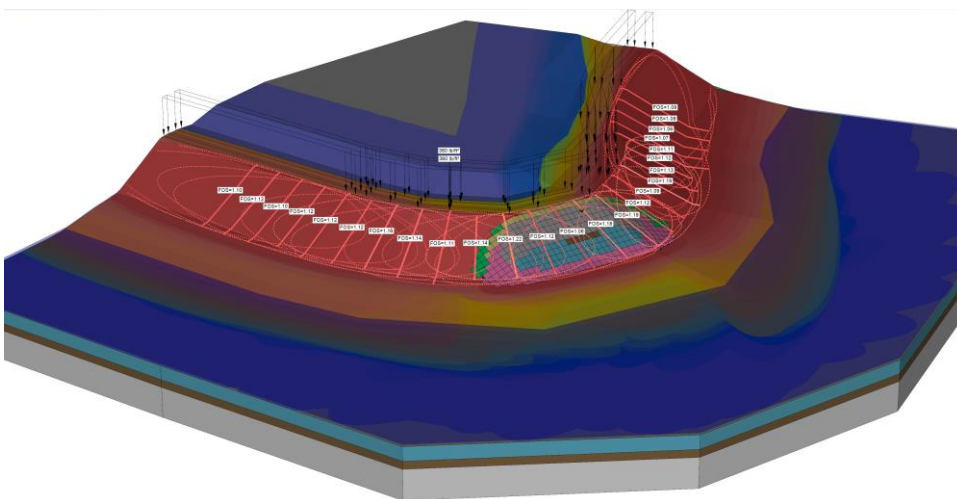
Существует фундаментальная разница между расчетами коэффициента устойчивости для нарушенных откосов с использованием 2D- и 3D-анализа. И хотя инженеры-геологи и геотехники до сих пор довольствуются использованием 2D-анализа устойчивости откосов (который легко выполнить), 2D-методы имеют следующие фундаментальные ограничения:

- принимается, что форма поверхности скольжения является цилиндрической;
- принимается, что геометрия откоса, геологических слоев и зеркала грунтовых вод остается неизменной в третьем измерении;
- не учитываются сдвиги на торцевых поверхностях.





Различия между 2D- и 3D-расчетами коэффициента устойчивости тесно связаны с геометрией модели и критической поверхностью скольжения. Известно, что величина  $K_u$ , полученная в 3D, почти всегда бывает выше, причем, по данным исследований, эта разница находится в пределах 15–50%. Для каждого отдельного сценария необходимо рассчитать точную разницу. Для этого рекомендуется выполнять как 2D-, так и 3D-анализ. Затем для интерпретации результатов моделирования можно применить профессиональное суждение.



В целом инженеры-геологи и геотехники должны уделять пристальное внимание следующим факторам, которые могут повлиять на итоги расчетов коэффициента устойчивости:

- форме поверхности скольжения;
- топографии;
- геологическим слоям;
- уровню грунтовых вод;
- распределенным / точечным нагрузкам;
- анкерам / микросваям / геомембранам.

## 3D-анализ – это более точное представление реального мира

После более чем 20 лет исследований в академических кругах можно считать доказанным, что трехмерный анализ дает более точное представление реальных ситуаций. При этом чем достовернее коэффициент устойчивости, вычисленный для откоса, тем точнее анализ.



Рассмотрим следующие сценарии.

1. *Анализ земляной дамбы.* Грунт, используемый для строительства земляных дамб, является довольно дорогостоящим, тем более что такие сооружения могут протягиваться на многие километры. Проектирование дамбы с избыточным запасом устойчивости, получающееся при использовании 2D-анализа, может привести к увеличению затрат на строительство. Но при этом имеется потенциальная возможность моделирования пересечений земляных дамб для улучшения проекта.

2. *Глубокие фундаменты.* При проектировании высотных зданий необходимо минимизировать осадки фундаментов, чтобы ограничить повреждения их надфундаментных конструкций. Трехмерный анализ обеспечивает более реалистичную оценку напряжений, смещений и усилий при использовании свай с круглым и квадратным сечением.

3. *Хвостохранилища.* Недавние аварии на хвостохранилищах привлекли больше внимания к анализу устойчивости. Трехмерный анализ устойчивости сложных сооружений хвостохранилищ позволяет более точно понять их долгосрочное поведение.

4. *Анализ процесса кучного выщелачивания* (процесса получения металлов или других веществ путем растворения раздробленных забалансовых руд, отвалов бедных руд или хвостов обогатительной фабрики, уложенных в специальный штабель, с последующим выделением нужных компонентов из циркулирующих растворов. – *Ред.*). При использовании штабелей кучного выщелачивания с крутыми боковыми откосами может быть извлечено большее количество полезных компонентов. Однако повышенная крутизна откосов приводит к состоянию, близкому к разрушению. В этом случае 3D-анализ может более точно представить геометрию штабеля кучного выщелачивания. При этом важно точно сбалансировать угол наклона откоса и процент извлечения нужного компонента.

## Особый случай обратного анализа

Еще одним важным применением 3D (в разных вариантах) является случай обратного анализа разрушения. Обычно инженеры-геологи и геотехники проводят обратный анализ в 2D, в результате чего получается коэффициент устойчивости, равный 1,0, что переоценивает

прочность материалов откоса. Использование же 3D позволит получить более низкие значения прочностных свойств материала по сравнению с 2D, но эти значения будут более достоверными.

В результате, если вы проведете обратный анализ с использованием 2D, а затем попытаетесь выполнить прямой анализ с использованием 3D, вы переоцените коэффициент устойчивости откоса, что приведет к опасному состоянию последнего. Инженер всегда должен использовать для обратного анализа 3D, чтобы точно определить прочностные свойства материала.

### **Заключение**

Двадцать с лишним лет исследований ясно показали, что 3D-анализ устойчивости откосов является более хорошим и точным инструментом, чем 2D. И хотя основной причиной большей популярности 2D-анализа ранее была его простота, теперь существуют передовые программные технологии, позволяющие просто и быстро проводить 3D-анализ с использованием надежных методов вычислений. Кроме того, усовершенствованные расчеты коэффициента устойчивости в 3D могут повлиять на профессиональное проектирование и на затраты, связанные с проектом.

### **Источник**

1. Fredlund M. The case for 3D geotechnical analysis // Bentley.com. 12.10.2019. URL: [bentley.com; informedinfrastructure.com/52343/engineered-solutions-the-case-for-3d-geotechnical-analysis/](http://bentley.com/informedinfrastructure.com/52343/engineered-solutions-the-case-for-3d-geotechnical-analysis/).