

УДК 66.047.75

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-3-286-45-47

*М. Н. Буза, А. В. Делев, А. Г. Алехин***ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА СЫПУЧИХ ВЕЩЕСТВ  
НА ОСНОВЕ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

В статье рассматривается задача определения угла естественного откоса сыпучих материалов. Проанализированы существующие устройства для измерения угла естественного откоса. Выбран подходящий способ измерения угла естественного откоса для разрабатываемой системы автоматического 3D измерения объема сыпучих веществ.

*Ключевые слова:* угол естественного откоса, сыпучие вещества.

*M. N. Buza, A. V. Deljov, A. G. Alekhin***DETERMINATION OF THE NATURAL ANGLE  
OF REPLACEMENT OF BULK SUBSTANCES BASED  
ON THE TRIANGULATION MODEL****Volgograd State Technical University**

The article considers the problem of determining the angle of natural slope of bulk materials. The main theoretical provisions are considered, the existing devices for measuring the angle of natural slope of granular-lumpy material are analyzed. Based on the data obtained, the most suitable method of measuring the angle of natural slope for the developed system of automatic 3D measurement of bulk substances volume was selected.

*Keywords:* angle of natural slope, bulk substances.

Для толкования сущности исследуемых процессов и выработки практических решений необходимо проводить детальную и объективную оценку физико-механических свойств рабочих сред. Результаты исследований должны соответствовать свойствам рабочей среды. Основываясь на результатах исследований, решаются задачи проектирования технологий. Одним из таких физико-механических свойств сыпучих сред является угол естественного откоса.

Целью исследования является определение способа измерения величины естественного откоса для триангуляционной модели поверхности сыпучего вещества.

Задачи исследования:

- рассмотреть теоретические положения об определении угла ссыпания и угла естественного откоса зернисто-кускового материала;
- проанализировать существующие устройства для измерения угла естественного откоса, определить методы, используемые вычисления;
- использовать изученные методы для определения угла естественного откоса на триангуляционной модели.

Зернисто-кусковой материал, расположенный на наклонной плоскости при определенном

угле наклона начинает скатываться. Угол наклона, при котором материал начинается ссыпаться называется углом ссыпания. Фракция материала, а также форма кусочков влияет на вид движения сыпучего материала по наклонной поверхности. Существует два вида движения материала: скольжение и перекатывания. Скольжения происходит для материалов, у кусков которых есть плоские грани. Перекатывание наблюдается у материалов с элементами с формами близкими к шару.

Для нашего случая измерение проводится для слоя сыпучего материала, который имеет куски, приближенные к шарообразной форме. Но практика показывает, что перемещение слоя сыпучего материала, вопреки ожиданиям, несет характер скольжения, а не перекатывания, так как весь материал перемещается сплошной массой.

В наших исследованиях зерно-кусковой материал располагается на горизонтальной плоскости и насыпается сверху, что образует на поверхности конус. Угол между образующей конуса и горизонтальной плоскостью называется углом естественного откоса зерно-кускового материала (рис. 1).

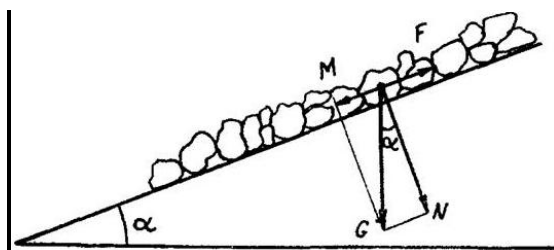


Рис. 1. Предельное состояние покоя кускового материала на наклонной плоскости:

$\alpha$  – угол сыпания зернисто-кускового материала,  $F$  – сила трения,  $G$  – сила тяжести,  $N$ ,  $M$  – проекции силы тяжести

Угол естественного откоса для конкретного материала всегда больше угла сыпания из-за того, что неровности материала не дают скатываться и тем более скользить кускам материала [1].

На угол естественного откоса влияет размер фракции материала, потому что крупные куски подвержены скатыванию намного больше, нежели мелкие куски, так как неровности поверхности оказывают меньшее сопротивление скатыванию крупных кусков. Измельченные куски сыпучего материала имеют больший угол естественного откоса из-за развитой поверхности трения.

Одним из важнейших свойств угла естественного откоса является зависимость от влажности измеряемого материала [2]. Вода, которая располагается на поверхности каждого из кусков, вызывает слипание и тем самым затрудняет движения отдельных кусков. Чем меньше фракция сыпучего материала, тем больше влияние влажности на угол естественного откоса [3].

В воздушно-сухом состоянии угол естественного откоса песчаного грунта равен  $30\text{--}40^\circ$ , под водой –  $24\text{--}33^\circ$ .

Знание углов естественного откоса и сыпания необходимо при проектировании складских помещений, транспортеров, шахтных печей, где имеют дело с сыпучими материалами. Невозможность учета теоретически всех факторов, определяющих величину этих углов, приводит к необходимости экспериментального их определения.

Одним из существующих средств для измерения угла естественного откоса является прибор УВТ (рис. 2), представляющий собой резервуар, в который помещается образец сыпучего вещества. По центру прибора располагается градуированная шкала, по которой определяется высшая точка конуса, а вдоль горизонтальной поверхности расположена шкала позволяющая определить радиус конуса.

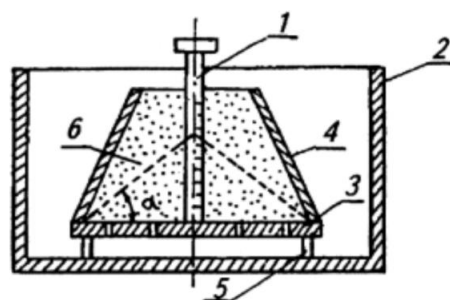


Рис. 2. Прибор УВТ:

1 – шкала; 2 – резервуар; 3 – перфорированная подставка; 4 – обойма; 5 – градуированная опора; 6 – образец песка

Угол естественного откоса будет определяться как арктангенс частного высоты конуса на радиус конуса [4].

Также для вычисления угла естественного откоса используют измерительный цилиндр (рис. 3).

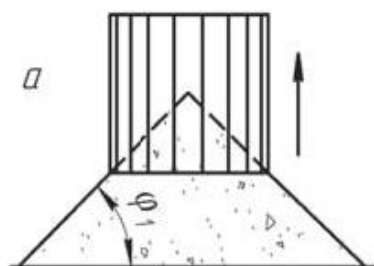


Рис. 3. Измерительный цилиндр, градуированный по высоте

Для того, чтобы провести вычисление необходимо рассыпать измеряемый материал на горизонтальной плоскости и на него поместить сверху измерительный цилиндр. Радиус цилиндра есть постоянная величина, а по градуируемой поверхности просто определяется значение для высшей точки конуса. Данный способ по сравнению с предыдущим немного упрощает измерение, так как нет необходимости измерять радиус конуса сыпучего вещества.

В разрабатываемой системе измерение поверхности происходит с помощью оптического сканера и не предполагается доступа к измеряемому веществу человека, что не дает использовать рассмотренные способы измерения угла естественного откоса, но эти способы могут стать основой для разработки.

От оптического сканера на выходе имеем облако точек в трехмерном пространстве, которые с помощью ПО преобразуются в триангуляционную модель (рис. 4). Эта модель является довольно точной копией измеряемого вещества и может использоваться для анализа. Рассматривая первый и второй способ измерения угла естественного откоса, можно сделать вы-

вод, что для расчета требуется самая высокая точка и точка, которая будет находится на краю фактической горизонтальной плоскости (как в первом рассмотренном способе) или на искусственно выбранной (как во втором способе).

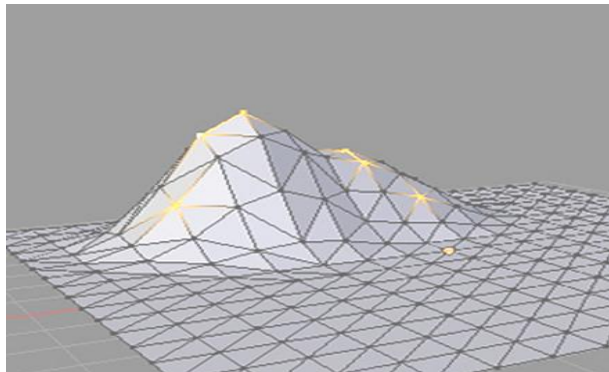


Рис. 4. Триангуляционная модель сыпучего вещества

Проводить измерение по внешнему краю исследуемой поверхности не имеет смысла, так как существует вероятность влияния внешних факторов на расположение точек. Например, грузовик, который отъезжал после выгрузки песка и кузовом сделал поверхность более полой.

Для того чтобы максимально исключить возможность совершения ошибок предлагается использовать несколько фиксированных окружностей для проведения измерения (рис. 5). Используя максимальную высоту насыпи, необходимо поделить на промежуточные кольца и измерять угол естественного откоса сначала от вершины насыпи, а затем между промежуточными кольцами. Среднее значение угла естественного откоса и будет использоваться для дальнейших вычислений.

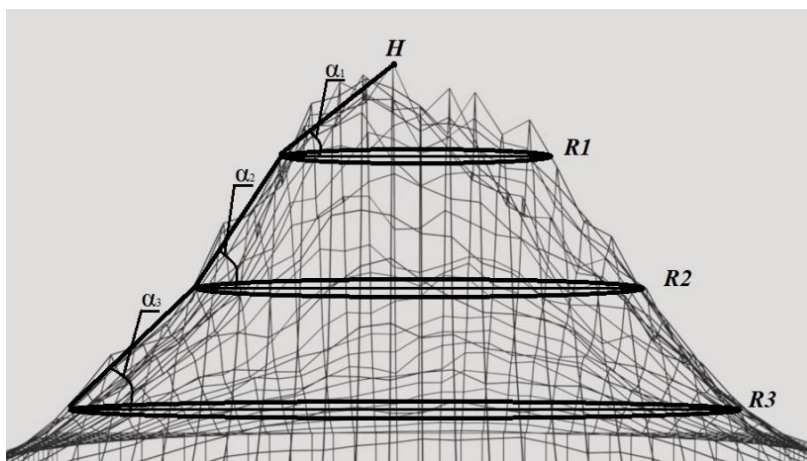


Рис. 5. Насыпь, разбитая на промежуточные кольца:  
R1, R2, R3 – промежуточные кольца, H – вершина насыпи,  
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы естественного откоса

В результате были рассмотрены теоретические положения об определении угла естественного откоса, рассмотрены распространенные способы измерения и выделены их особенности.

На основе изученных методов был выбран способ измерения угла естественного откоса для триангуляционной модели, позволяющий в дальнейшем определять влажность исследуемого сыпучего вещества, что даст возможность принимать наиболее экономически оправданные управляющие решения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перепелкин, М. А. Исследование угла естественного откоса строительных и рудных материалов при проекти-

ровании и разработке строительно-дорожных, горных машин и оборудования / М. А. Перепелкин, С. В. Перепелкина // Горная промышленность. – 2017. – № 4 (134). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ugla-estestvennogo-otkosa-stroitelnyh-i-rudnyh-materialov-pri-proektirovanii-i-razrabotke-stroitelno-dorozhnyh-gornyh> (дата обращения: 03.02.2023).

2. Белоусов, Н. И. Исследование влияния угла естественного откоса от влажности извести / Н. И. Белоусов, М. И. Шор, А. А. Смецкой // Современные проблемы и направления развития агроинженерии в России : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., Курск, 28 октября 2022 года. – Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2022. – С. 32–34.

3. Анализ процесса сдвига сыпучего материала / С. Г. Кондрашева, В. А. Лашков, Л. Г. Голубев, П. К. Кириллов. – 2003. – № 2. – С. 148–158.

4. Григор, А. С. Определение угла естественного откоса и угла внутреннего трения оборотной смеси / А. С. Григор // Ползуновский альманах. – 2019. – № 3. – С. 73–76.