



УДК 621.6.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ОТ ЕГО ВЛАЖНОСТИ



### STUDY OF THE DEPENDENCE BULK MATERIAL CHARACTERISTICS ON ITS HUMIDITY

**Гребенникова Валерия Антоновна**

студент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
Волгоградский государственный технический университет  
romanenkovavaleriya@mail.ru

**Мансур Лина Мохамад**

студент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
Волгоградский государственный технический университет  
l.mansur2010@yandex.ru

**Шагарова Анжелика Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
Волгоградский государственный технический университет  
shagarang@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены методика и результаты экспериментальных исследований зависимости угла естественного откоса и угла обрушения сыпучего материала от его влажности.

**Ключевые слова:** угол естественного откоса, угол обрушения, сыпучий материал, влажность.

**Grebennikova Valeriya Antonovna**

Student of the Department «Processes and Apparatus of Chemical and Food Production»,  
Volgograd State Technical University  
romanenkovavaleriya@mail.ru

**Mansur Lina Mohamad**

Student of the department «Processes and Apparatus of Chemical and Food Production»,  
Volgograd State Technical University  
l.mansur2010@yandex.ru

**Shagarova Anzhelika Anatolevna**

Ph. D., Associate Professor of  
the Department «Processes and Apparatus of Chemical and Food Production»,  
Volgograd State Technical University  
shagarang@mail.ru

**Annotation.** The article presents the methodology and results of experimental studies of the dependence of the bulk material natural escarpment angle and the angle of repose on its humidity.

**Keywords:** natural escarpment angle, angle of repose, bulk material, humidity.

**И**нтенсивность и эффективность многих технологических процессов, таких как классификация, измельчение, транспортирование, процессы термической сушки и пр. в значительной степени зависят от механических свойств материала, в частности, от его сыпучести.

Сыпучесть зависит от гранулометрического состава материала, его влажности, степени уплотнения и проявляется по-разному.

Оценку сыпучести высушиваемого материала, как правило, начинают с измерения угла естественного откоса сыпучего материала.

Широкое использование этого показателя в технике для определения наклона стенок при конструировании бункеров, аппаратов, контейнеров, воронок, течек, желобов, хранилищ и транспортирующих лент объясняется простотой и наглядностью его измерения.

Углом естественного откоса называется угол наклона образующей конуса сыпучего материала, отсыпанного без толчков и вибраций, к горизонтальной плоскости. Эта характеристика связана одновременно с аутогезией, внутренним трением и плотностью частиц сыпучего материала и его гранулометрическим составом.

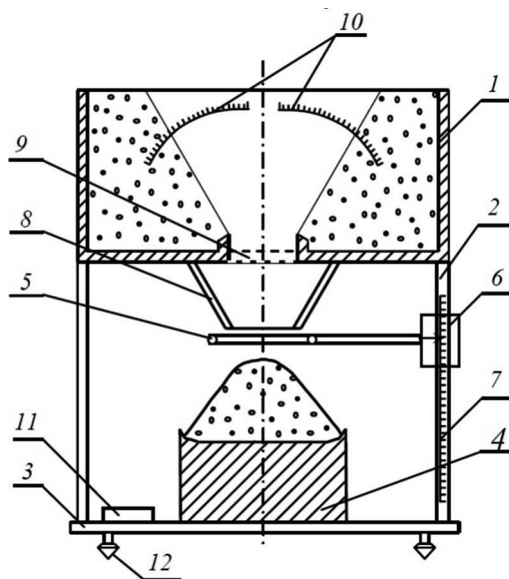
Наряду с углом естественного откоса различают угол обрушения, характеризующий положение поверхности откоса, образованной в результате сползания части сыпучего материала. Угол обрушения всегда больше угла естественного откоса [1]. Угол обрушения служит важным параметром при проектировании транспортных средств и бункеров для хранения сыпучих материалов и наряду с этим применяется в научных исследованиях. В литературе имеются и другие названия этих параметров: угол естественного откоса – динамический угол откоса, угол трения движения, угол насыпания; угол обрушения – статический угол откоса, угол трения покоя.

Существуют различные подходы к экспериментальному определению углов естественного откоса и обрушения [1–4].

На практике используются различные технические устройства, позволяющие одновременно определять углы естественного откоса и обрушения.



Для исследования влияния влажности сыпучего материала на углы естественного откоса и обрушения была изготовлена экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Устройство для определения углов обрушения и естественного откоса:  
 1 – короб; 2 – стойки; 3 – основание; 4 – диск; 5 – подвижное кольцо; 6 – указатель; 7 – шкала; 8 – воронка;  
 9 – задвижка; 10 – угловые шкалы; 11 – уровень; 12 – регулировочные винты

Исследуемый материал засыпают в короб 1, который на стойках 2 установлен на основании 3. Под коробом установлен диск 4. В исходном положении отверстие в дне короба закрыто задвижкой 9. После того, как пластину выдвигают, часть материала высыпается из короба, и образуются две поверхности обрушения. Численные значения углов обрушения определяют по угловым шкалам 10 или при помощи транспортира. После высыпания из короба поток материала формируется воронкой 8 и попадает на диск 4.

На диске образуется конус из материала, а излишки материала ссыпаются на основание 3. С помощью подвижного кольца 5 и указателя 6 по шкале 7 определяют высоту усеченного конуса и далее рассчитывают угол естественного откоса:

$$\alpha_D = \arctg\left(\frac{2H}{D_D - D_K}\right), \quad (1)$$

где  $H$  – высота усеченного конуса материала, м;  $D_D$  – диаметр диска 4, м;  $D_K$  – диаметр кольца 5, м.

Учитывая, что диаметры кольца 5 и диска 3 постоянны, шкалу 7 можно градуировать в градусах, чтобы исключить необходимость вычисления угла естественного откоса [1].

Методика проведения эксперимента.

1. Отобрать массу сыпучего материала, предназначенную для определения естественного угла обрушения и откоса весом  $M = 6$  кг.

2. Отобрать пробу и при помощи датчика влажности Keyestudio определить начальную влажность сыпучего материала, которая должна равняться 0 %.

3. Поместить исследуемый сыпучий материал в короб 1.

4. Открыть задвижку 9, в результате чего материал частично ссыпается на диск 4. При помощи транспортира и подвижного кольца определить угол естественного обрушения и угол естественного откоса.

5. Выполнить пункты 1–4 не менее трех раз. Расхождение между повторными определениями не должно превышать  $2^\circ$ .

6. Увеличить значение влажности исследуемого материала в заданной пропорции и выполнить пункты 3 и 4 не менее 3-х раз.

В качестве исследуемого материала использовался песок. Экспериментальные исследования проводились при разной влажности материала для 3 параллельных опытов. На рисунке 2 показан общий вид экспериментальной установки по определению угла естественного откоса в покое и угла естественного обрушения для сухого (а) и влажного (б) песка.

Результаты исследований представлены в таблице 1.



**Рисунок 2** – Общий вид экспериментальной установки по определению угла естественного откоса в покое и угла естественного обрушения: а – сухой песок, б – увлажненный песок

**Таблица 1** – Результаты экспериментальных исследований

№	Влажность $\omega$ , %	Угол естественного откоса $\alpha_d$ , град.			Угол обрушения $\alpha_{обр}$ , град.		
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1	0	24	24	23	22,5	23	22
2	0,25	32	32	32	62	61	62
3	0,42	35	37	35	69	69	70,5
4	0,58	35	36	37	71,5	71,5	72
5	0,75	37	37	36	80,5	80,5	0,81
6	0,92	37	37	39	83,5	82	82
7	1,08	36	38	37	87	85,5	86
8	1,25	37,2	37,2	37,2	88	88	87
9	1,42	35,6	36,4	37,9	90	90	90
10	1,58	37,2	37,2	35,6	90	90	90
11	2	37,2	38,7	34,8	90	90	90
12	2,33	37,2	37,2	37,9	90	90	90
13	2,67	37,2	37,2	37,2	90	90	90
14	3	35,6	37,2	37,2	90	90	90
15	3,33	37,2	36,4	37,2	90	90	90
16	4,17	38,7	37,2	37,2	90	90	90
17	5	39,4	37,9	38,7	90	90	90

Как видно из рисунков 3 и 4, угол естественного откоса в покое и угол естественного обрушения увеличиваются с увеличением содержания влаги в объеме материала. Данное явления связано с тем, что сухие песчинки слабо связаны между собой, а влажные в результате увеличения сил сцепления наоборот легко слипаются. Силы сцепления увеличиваются из-за того, что вода обволакивает каждую частичку песка тончайшим слоем, в результате действия сил поверхностного натяжения. Частицы притягиваются друг к другу и довольно прочно «склеиваются». Но это происходит только тогда, когда вода покрывает частицы тонкой пленкой и большая часть пространства между ними остается заполненной воздухом.

Коэффициент трения сыпучего материала напрямую связан с углом естественного откоса [5].

$$f = \text{tg}(\alpha_d), \tag{2}$$

где  $f$  – коэффициент трения сыпучего материала.

Поскольку в нашей работе определялся угол естественного откоса материала находящегося в покое, то можно определить коэффициент трения материала в покое.



Рекомендуется соотношение между коэффициентом трения в покое и коэффициентом трения в движении принимать в интервале:

$$f_{дв} = (0,7 \div 0,9) \cdot f_{п}, \tag{3}$$

где  $f_{дв}$  – коэффициент трения сыпучего материала в движении;  $f_{п}$  – коэффициент трения сыпучего материала в покое.

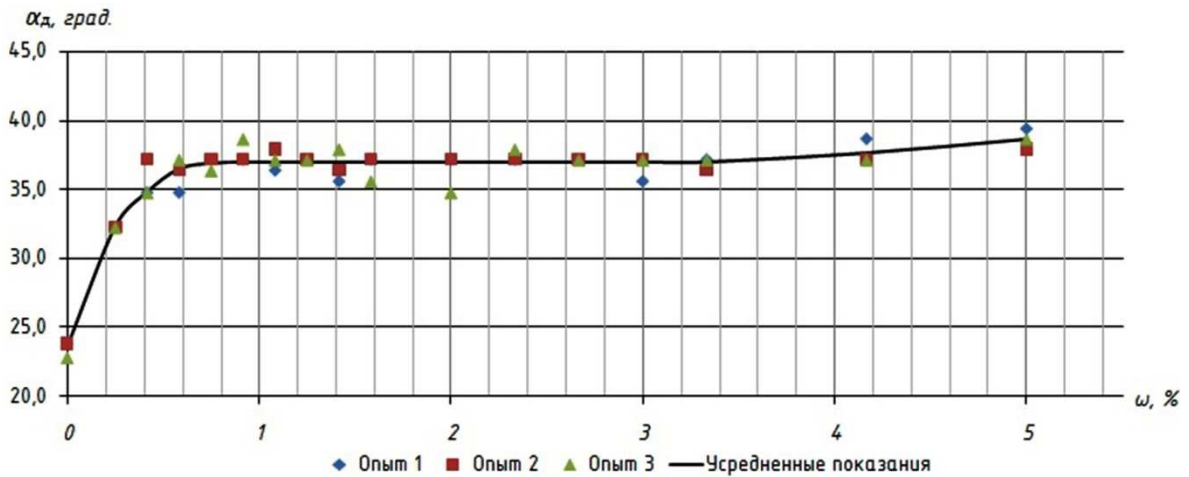


Рисунок 3 – Зависимость угла естественного откоса в покое от влажности

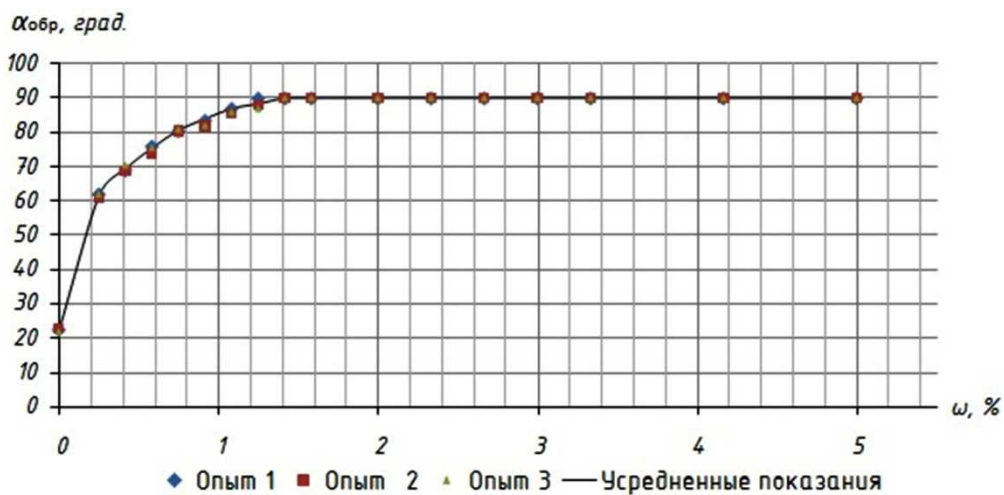


Рисунок 4 – Зависимость угла естественного обрушения от влажности

По формуле 3 определяем коэффициент трения сыпучего материала в движении. По формуле 2 определяем угол естественного откоса сыпучего материала в движении (табл. 2).

Таблица 2 – Максимальный угол наклона транспортера для перемещения исследуемого материала в зависимости от влажности

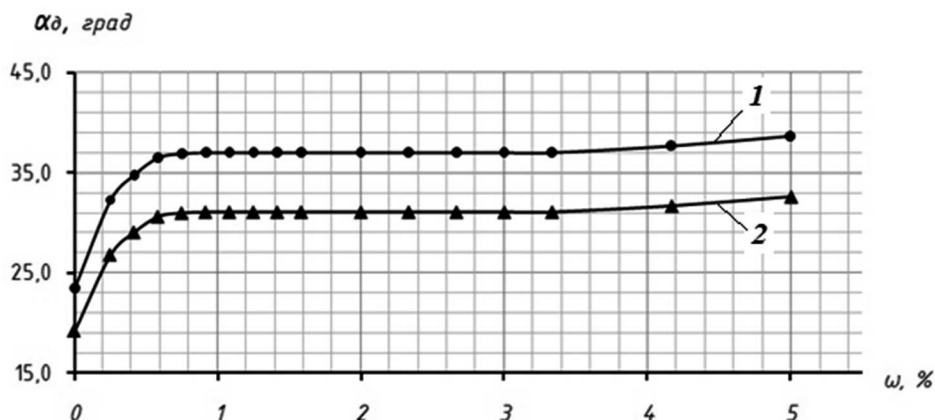
ω, %	0	0,25	0,42	0,58	0,75	0,92	1,08	1,25	1,42	1,58	2	2,33	2,67	3	3,33	4,17	5
$f_{дв}$	0,35	0,5	0,56	0,59	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,62	0,64
$\beta$	18	26	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	31	32

Например, при проектировании наклонных транспортеров необходимо соблюдать условие 4.

$$\operatorname{tg}\beta < f_{дв}, \tag{4}$$

где  $\beta$  – максимальный угол наклона транспортера.

Результаты расчетов коэффициента трения и угла естественного откоса в покое и в движении в зависимости от влажности материала представлены на рисунке 5.



**Рисунок 5** – Зависимость угла естественного откоса в покое и в движении от влажности:  
1 – в покое; 2 – в движении

Максимальный угол наклона транспортера для перемещения исследуемого материала в зависимости от влажности приведен в таблице 2.

Анализ экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о необходимости учета влияния влажности на основные характеристики сыпучих материалов.

Наибольший рост угла естественного откоса наблюдается в интервале изменения влажности  $0 \div 1,08$  %, при дальнейшем увеличении влажности угол асимптотически приближается к значению  $37^\circ$  и остается практически неизменным. При изменении влажности от  $3,33$  % до  $5$  % незначительно увеличивается.

Значительный рост угла естественного обрушения с  $22,5^\circ$  до  $90^\circ$  наблюдается в интервале изменения влажности  $0 \div 1,42$  %, далее его значение остается практически постоянным.

#### Литература:

1. Шубин И.Н. Сыпучие материалы и их свойства : Учеб. пособие / И.Н. Шубин, М.М. Свиридов, В.П. Таров. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 76 с.
2. Весовое дозирование зернистых материалов / В.Ф. Першин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2009. – 164 с.
3. Бачериков И.В. Определение угла естественного откоса сыпучих материалов / И.В. Бачериков, Б.М. Локштанов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – № 214. – С. 167–177.
4. Шершукова А.И. Анализ способов и устройств для определения физико-механических характеристик зернистых материалов / под ред. проф. Першина В.Ф. – ТГТУ, 2013. – С. 37–40.
5. Портаков А.Б. Способ определения коэффициента трения сыпучих материалов // Научный альманах. – 2017. – № 3-3(29). – С. 188–191.

#### References:

1. Shubin I.N. Loose Materials and their properties: Ucheb. Benefit / I.N. Shubin, M.M. Sviridov, V.P. Tarov. – Tambov : Izd-wo Tamb. State. Tech. Un-ty, 2005. – 76 p.
2. Weight dosing of grainy materials / V.F. Pershin [et al.]. – M. : Mechanical engineering, 2009. – 164 p.
3. Bacherikov I.V. Determining the angle of natural eskin of bulk materials / I.V. Bacherikov, B.M. Lokshtanov // Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy. – 2016. – № 214. – P. 167–177.
4. Shershukova A.I. Analysis of ways and devices to determine the physical and mechanical characteristics of grainy materials / ed. Prof. Pershina V.F. – TGTU, 2013. – P. 37–40.
5. Portakov A.B. Way to determine the friction factor of bulk materials // Scientific almanac. – 2017. – № 3-3 (29). – P. 188–191.