

ИЗСЛЕДВАНЕ ПОВЕДЕНИЕТО НА КОНИЧНИ КУПЧИНИ ОТ ГРАНУЛИ И ПРАХ

Драгни Драгнев

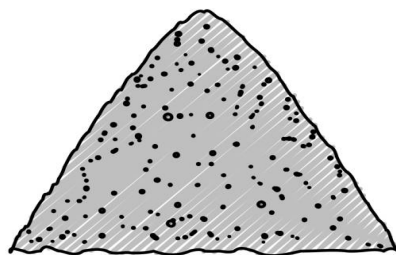
Технически университет в Мюнхен

Резюме. При изсипването на гранулиран материал върху дадена повърхност се наблюдава формирането на купчинка с конусовидна форма. В този доклад ще бъдат подробно засегнати факторите, които влияят на големината на ъгъла, който купчинката сключва със земята, още известен като ъгъл на естествен откос. Областта на физиката, която се занимава с изследването на подобни явления, се нарича механика на гранулираните материали. В първата част от доклада се включва качествено обяснение на това явление, както и причините, поради които е изключително важно да сме добре запознати с този феномен. Разгледано е и теоретичното обяснение на наблюдавания физичен ефект. В теоретичния модел се включва и ефектът на кохезионните сили, които започват да се проявяват при работата с фини материали. В експерименталната част от доклада релевантните параметри се разделят на две главни групи – такива, които влияят върху големината на сключения с повърхността ъгъл, и такива, които повлияват на формирането на конусовидната купчинка. Разгледан е и процесът на образуване на лавини, както и тяхното въздействие. Всеки един от тези параметри е подробно разгледан и описан. Представен е и методът на измерване, използваните инструменти, както и някои допълнителни фактори, които трябва да бъдат взети предвид при процеса на измерване на ъгъла.

Ключови думи: ъгъл на откос; гранулиран материал; конична купчина; лавина; кохезия; адхезия; влажност

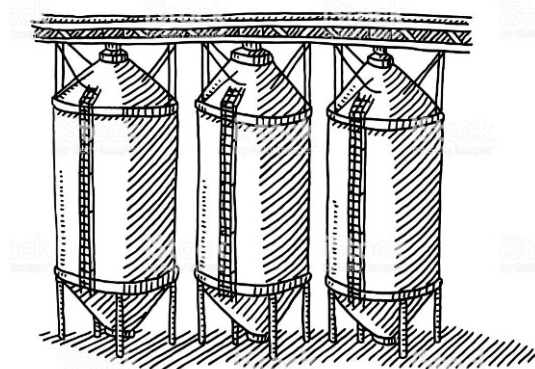
Ъгъл на естествен откос

При изсипване на гранулиран материал върху дадена повърхност се образува конусовидна купчина. Това е широко известно и разпространено явление. Повечето хора са се срещали директно с него. То се наблюдава при пясъчните замъци (фиг. 1¹⁾), при направата на силози (фиг. 2²⁾) и пътища (фиг. 3³⁾).



Фигура 1

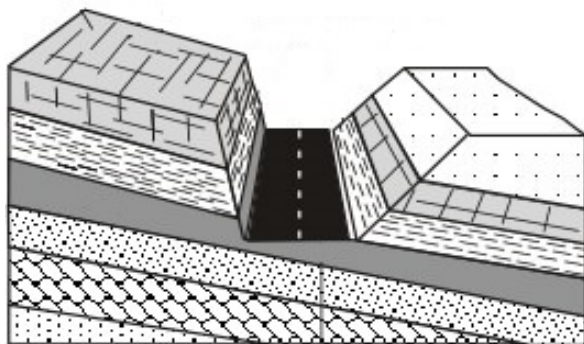
Всяка една такава купчина се характеризира с ъгъла, който конусът сключва със земната повърхност. Този ъгъл се нарича ъгъл на естествен откос. Той е уникален за всеки материал.



Фигура 2

На това изображение е илюстрирана конусовидната форма на долната и горната част на силозите. Тази форма е съобразена с ъгъла на естествен откос на материала, който се съхранява в тях, с цел оптимизиране на скоростта за изпразване на силозите.

Изследването на това явление дава възможност да се определи стабилността на различни склонове. Това помага да се намерят най-безопасните места за построяване на сгради и пътища (фиг. 3), както и да се предвиди вероятността за възникване на лавини или свлачища. Затова е от изключителна важност това явление да бъде добре изучено и разбрано.



Фигура 3

Аналитично описание

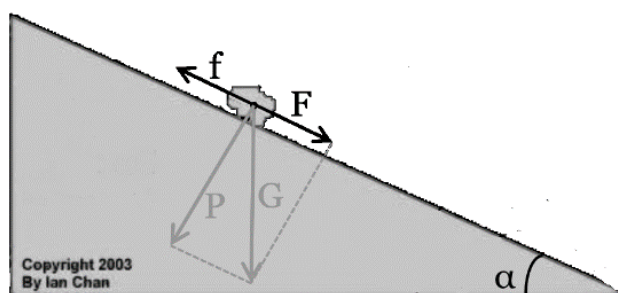
За да се обясни явлението, се разглежда единична частица, намираща се върху една от страните на конусовидна купчинка (фиг. 4). Главните сили, действащи върху тази частица, са силите на статично триене f и проекциите F и P на гравитационната сила G . α е ъгълът, който купчинката сключва със земята. Известно е, че:

$$f = kN \text{ и } G = mg \quad f = kN \text{ и } G = mg \quad (1), (2)$$

k е коефициент на статично триене, N е силата на нормална реакция, m е маса на песчинката и g е земно ускорение.

Оттук се извеждат формулите за P и F :

$$P = \cos\alpha G \text{ и } F = \sin\alpha G \quad P = \cos\alpha G \text{ и } F = \sin\alpha G \quad (3), (4)$$



Фигура 4

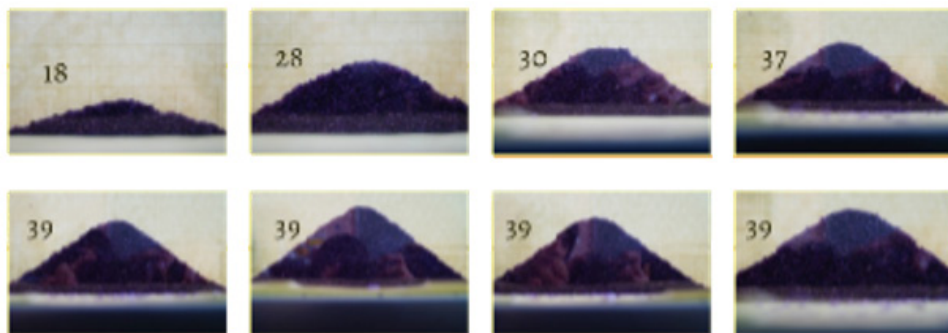
От тези формули се вижда, че при нарастването на ъгъл α F също нараства. Отчитайки, че f не се променя, тъй като е характеристика на материала, може ясно да се разделят етапите на сформирание на купчинка от гранулиран материал (фиг. 5)

Първият етап се състои в самото начало на изсипване на материала. Той продължава, докато ъгълът на купчинката спре да нараства. В този етап F нараства заедно с α .

Вторият етап се характеризира с изравняването на F и f , тогава системата е на ръба на стабилността. Именно ъгълът, който се образува между купчинката и повърхността по време на тази фаза, се нарича ъгъл на **естествен** откос.

При третия етап F става по-голямо от f , склонът става нестабилен и песчинките падат надолу. Вследствие на това се образува лавина и купчинката

се свлича, докато отново не се достигне стабилно положение. Този процес ще бъде разгледан по-подробно.



Фигура 5

При извеждането на формулата, която се използва, е най-важен вторият етап, когато:

$$f = F \quad (5)$$

Взимайки предвид (1), (2), (3) и (4),
от равенство (5) се извежда формулата:

$$k m g \cos \alpha = \sin \alpha m g \quad (6),$$

$$\text{следователно: } \alpha = \tan^{-1} k \alpha = \tan^{-1} k \quad (7).$$

Уравнение (7) може да се използва, когато частиците имат диаметър, надвишаващ приблизително 1 mm. Това число зависи от качествата на конкретния материал и не е константно при вещества с различни свойства.

При работа с материали, които имат значително по-малки диаметри от 1 mm, ефектът на кохезия⁴ между отделите частици става значим за ъгъла на естествен откос. За да се вземе това предвид в уравненията, формула (7) бива модифицирана, при което се получава:

$$m g \sin \alpha = k (m g \cos \alpha + C) \quad (8)$$

$$C = \xi d \quad (9)$$

C – се нарича сила на кохезия, ξ е означение за коефициент на пропорционалност, а d е диаметърът на частицата (J. T. Carstensen & Ping-Ching Chang 1976).

От уравнения (8) и (9) се намира зависимостта между ъгъла на естествен откос и диаметъра на частиците, които съставят конусовидната купчина.

Важно е да се отбележи, че тези формули не вадат, когато се работи с материали, чиито частици се привличат адхезионно⁵⁾. Последното явление е разгледано в по-нататъшна част на статията.

Параметри и експерименти

Параметрите, които ще бъдат изследвани в експериментите, могат да бъдат разделени на две главни части:

- параметри, свързани с условията на провеждане на експериментите (фиг. 6) – вътрешен диаметър на фунията; разстояние между края на фунията и върха на купчината; грапавост на повърхността.
- параметри, свързани със свойства на материала (фиг. 6) – грапавост и диаметър на частиците; плътност; влажност; еднородност.



Фигура 6

1. Вътрешен диаметър на фунията

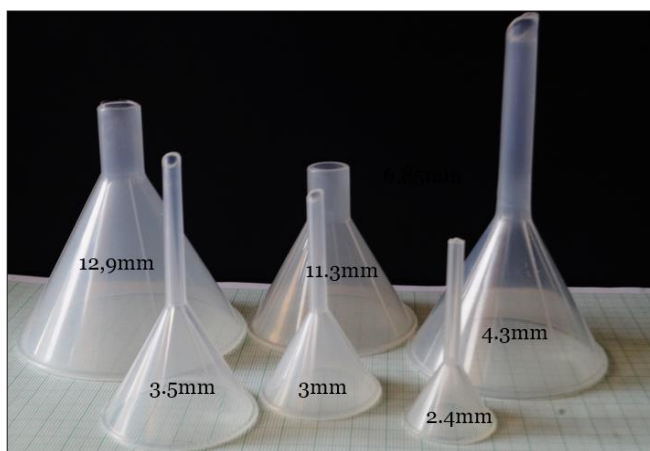
За провеждането на експериментите са използвани фунии с различни вътрешни диаметри – от 12,9 до 2,4 mm (фиг. 7).

Използването на различни фунии може да доведе до значителна разлика в експерименталните резултати.

Условието на равновесие при конусовидните купчинки се осъществява изключително трудно, тъй като трябва да бъдат премахнати или минимизирани всички външни фактори.

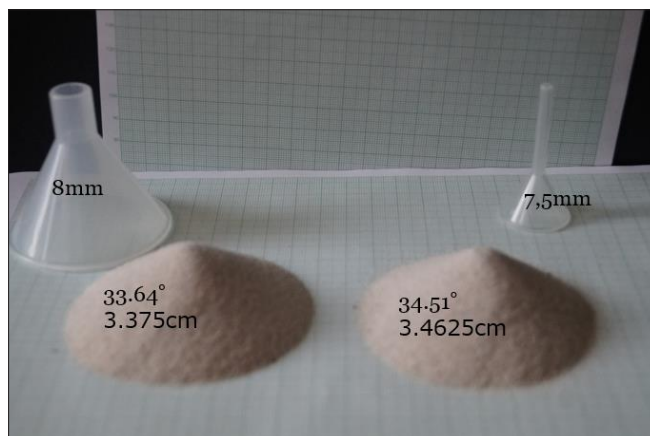
Вътрешният диаметър на фунията пряко влияе на един от тези фактори, а именно потокът на вещество през нея. Колкото по голям е той,

толкова по-голяма маса материал пада върху формиращата се купчинка. Това би могло да доведе до преждевременно свличане – (11) и (12). За да се предотврати този ефект, трябва да се използва фуния с възможно най-малък вътрешен диаметър.



Фигура 7

На (фиг. 8) са показани две купчинки, формирани от еднакви обеми от един и същ материал. Разликата при формирането на двете е, че при тази отляво е използвана фуния с по-голям вътрешен диаметър.



Фигура 8

Разликите са показани, както следва в таблица 1.

Таблица 1

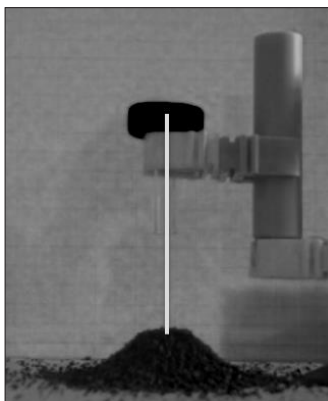
	Купчина 1	Купчина 2
Диаметър на фунията	8 mm	2,4 mm
Височина на образуваната купчина	3,38 cm	3,46 cm
Ъгъл, сключен с повърхността	33,64°	34,51°

Ясно се вижда, че купчинката, образувана от фунията с по-голям вътрешен диаметър, е не само по-ниска, но и сключва по-малък ъгъл с повърхността.

За да може да се минимизира грешката от този фактор, във всеки бъдещ експеримент е използвана фуния с възможно най-малък вътрешен диаметър.

2. Разстояние между края на фунията и върха на купчинката

Следващият параметър, който се разглежда, е разстоянието между края на фунията и върха на конусовидната купчинка (фиг. 9 и 10).



Фигура 9

На тази снимка се вижда купчинка, частиците на която са се свлекли поради голямата височина, от която пада материалът. Свидетелство за това са по-малкият ъгъл, който тя сключва със земята, и притъпеният ѝ връх.

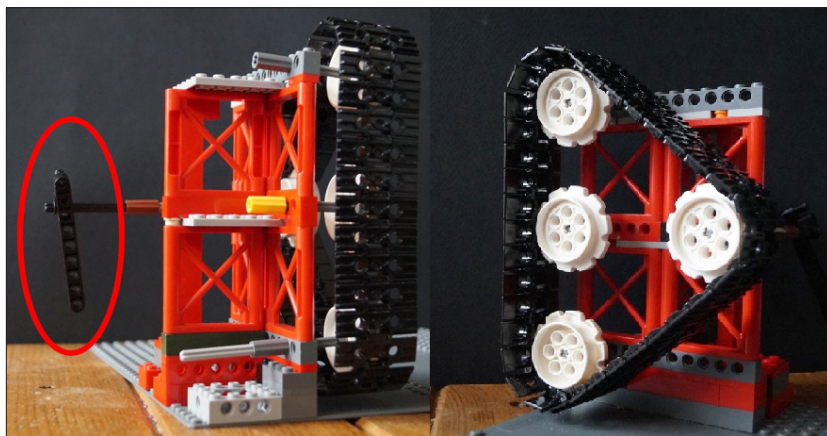
Когато материалът изтича от по-високо, той пада за повече време. От това следва, че скоростта, с която той ще падне върху образуващата се купчинка, ще е по-голяма.

$$p = mV \text{ и } F = \frac{dp}{dt} \quad (11), (12)$$

От формулите (11) и (12) следва, че при по-голяма височина на фунията материалът ще упражнява по-голяма сила при падането си върху купчинката.

Поради този факт, с цел постигането на възможно най-точни резултати, разстоянието между края на фунията и началото на конуса трябва да остане минимално в продължение на процеса на сформирание на купчинката.

За елиминирането на този проблем бе конструиран механизъм, с чиято помощ се контролира височината на фунията по време на формирането на конусовидната купчинка (фиг. 10, фиг. 11).



Фигура 10

При завъртането на лоста, ограден в червената елипса отляво, се завъртат зъбните колела, които задвижват веригата, за която се закача фунията – фиг. 11.



Фигура 11

От лявата страна на фигура 11 е показано разстоянието, което се поддържа между края на фунията и върха на конусовидната купчинка.

При провеждането на всички следващи експерименти е използвана тази механична система.

3. Грапавост на повърхността

Следващият изследван параметър е грапавостта на повърхността, върху която се формира купчината. За тази цел биват използвани три различни вида шкурки, хартиен лист и стъкло. Те служат за повърхности, върху които биват изсипани два различни материала- сол и пясък. Резултатите са систематизирани в (табл. 2).

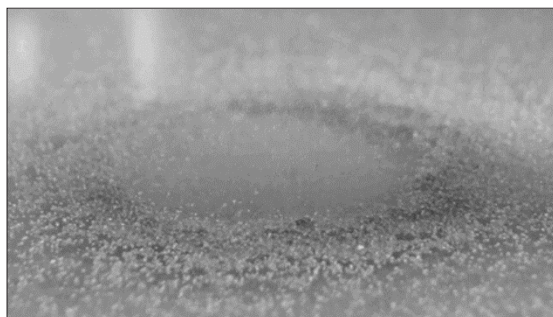
Таблица 2

Повърхност	Ъгъл	Пясък	Сол
Стъкло		39°	31°
Хартиен лист		39°	31°
Шкурка 1		39°	31°
Шкурка 2		39°	31°
Шкурка 3		39°	31°

Шкурка 1 е най-фината от трите шкурки, а шкурка 3 е най-грапавата.

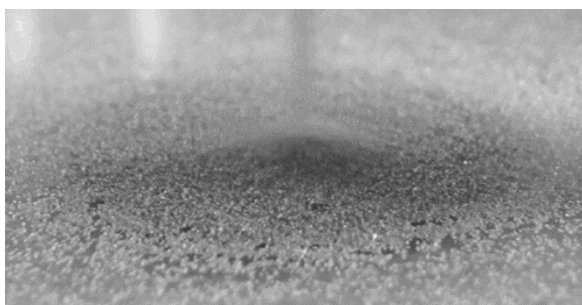
От проведените експерименти се вижда, че грапавостта на повърхността, върху която се образува конусовидната купчинка, не влияе на ъгъла на естествен откос. В такъв случай, трябва да се отговори на какво точно се дължи това. За тази цел бива изследвано по-подробно формирането на купчинката.

При внимателни наблюдения се вижда, че още преди да започне да се формира купчинката, върху повърхността се образува слой от материала, който е изсипван (фиг. 12). Върху този вече готов слой започва да се образува купчинката (фиг. 13). Формирането на този слой може да се характеризира като **етап 0** в образуването на конусовидна купчинка. Този етап е значително по-забележим, когато фунията е поставена на по-голямо разстояние от повърхността. Това се дължи на факта, че частиците на материала се разпръскват повече и формираният слой става по-голям. Ефектът е почти незабележим, когато фунията е позиционирана близо до повърхността.



Фигура 12

На тази фигура се вижда формирането на повърхностния слой в етап 0 от образуването на купчинката. След като частиците изпаднат от фунията, те се удрят и отскачат от повърхността. Вследствие от това се образува пръстен като този на фигурата. Той започва да се запълва, докато не се получи приблизително кръгъл слой частици върху повърхността.



Фигура 13

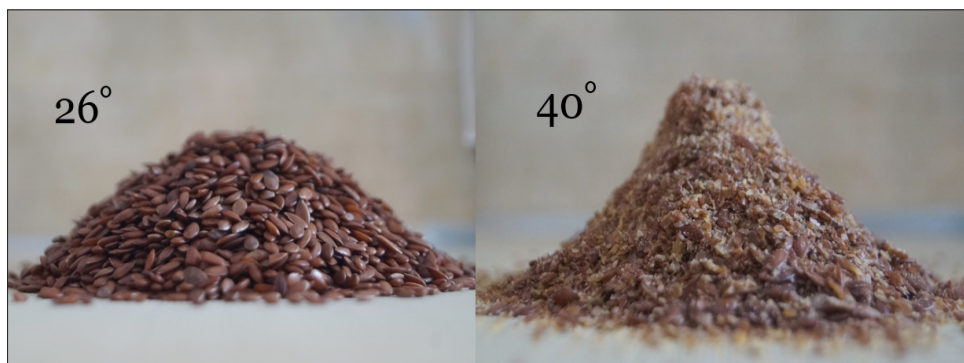
На тази фигура вече се е образувал ясно видимият повърхностен слой, което слага край на етап 0 и дава начало на етап 1.

4. Грапавост на частиците

Грапавостта на частиците пряко влияе на k – коефициент на статично триене (1). Теорията предвижда, че колкото е по-голям този коефициент, толкова по-голям ъгъл на естествен откос може да бъде постигнат. Това твърдение се потвърждава и от проведените експерименти.

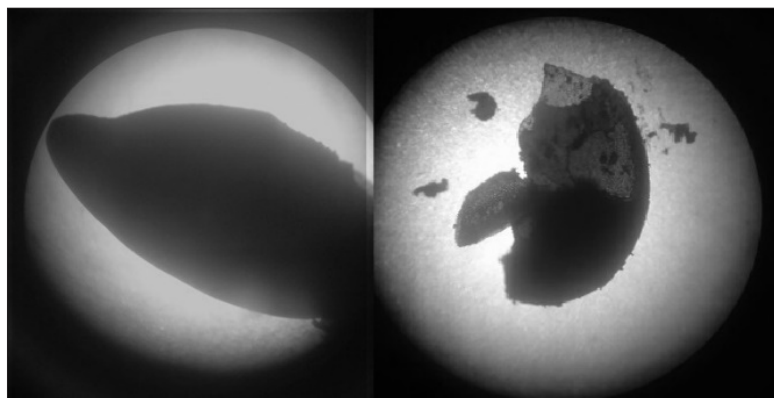
Експеримент 1

Този експеримент се състои във формирането на две купчинки. Едната, изградена от ленено семе, а при другата то е натрошено (фиг. 14).



Фигура 14

При наблюдение на частиците от двата материала под микроскоп, веднага става ясна причината за голямата разлика в ъглите (фиг. 15).

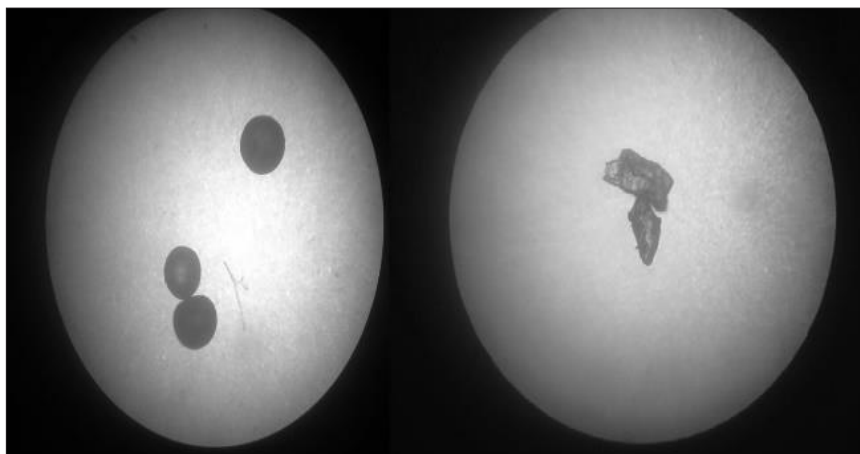


Фигура 15

На фигура 15 ясно се вижда, че натрошеното ленено семе има много повече остри ръбове и неравности по своята повърхност в сравнение с нормалното ленено семе, което е гладко и обло.

Експеримент 2

Недостатък на експеримент 1 е, че освен грапавината на частиците се променя и тяхната маса, което допълнително допринася за нарастването на ъгъла на естествен откос (8). При втория експеримент са използвани два вида сол, чиито частици почти не се различават по маса и размер (фиг. 16).



Фигура 16

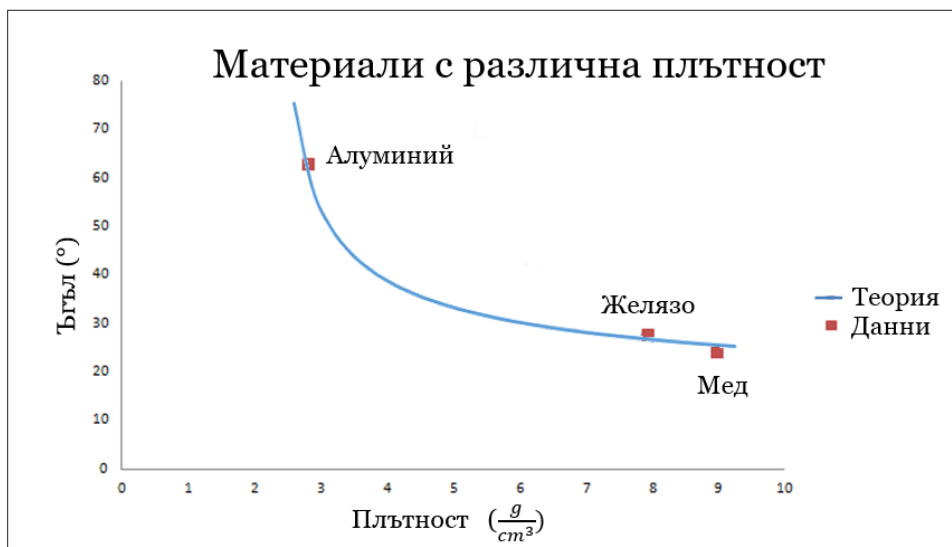
Както се вижда на фиг. 16, частиците на солта вляво имат почти сферична форма, за разлика от частиците на тази отдясно. Следователно ъгълът на естествен откос при първата следва да бъде по малък. Това и се наблюдава (фиг. 17).



Фигура 17

5. Плътност на материала

Масата на частиците пряко зависи от плътността на съставляция ги материал, затова и тя е от значение. Променяйки плътността, може да променим масата на частиците, запазвайки техния диаметър. С други думи, при промяна на плътността може да се изолира масата като параметър и да се изследва експериментално нейното влияние (фиг. 18). За тази цел са проведени експерименти с три различни метала на прах (алуминий, мед и желязо), с приблизително еднаква форма и размер на частиците.



Фигура 18

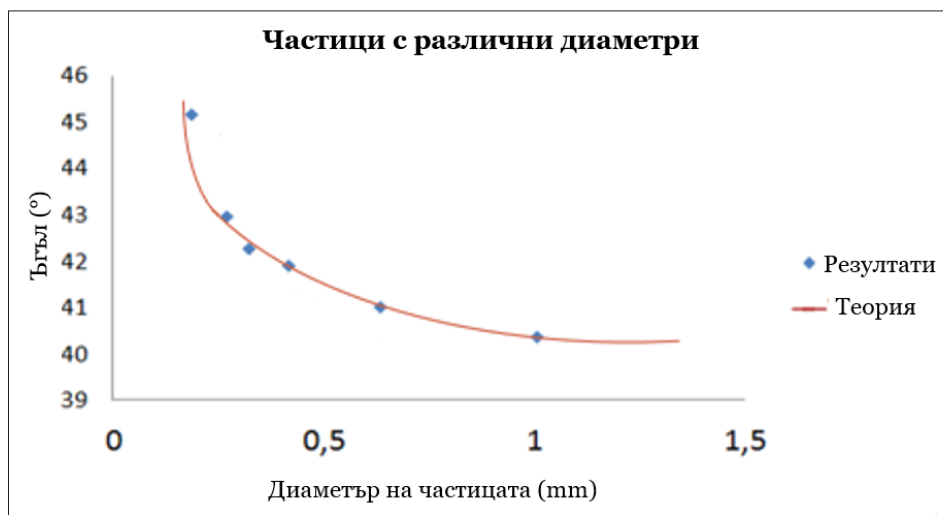
Ясно забележимо е много доброто съвпадение между експериментални данни и теория, но е важно да се отбележи, че теоретичната крива е напасната спрямо параметрите ξ и k (1), (9), тъй като за частици с малки размери е почти невъзможно да се измери експериментално стойността на тези параметри. Поради факта, че в научната литература няма конкретни данни за точните стойности на тези параметри, не може да бъде направено и пълно сравнение.

Резултатите от експериментите не се различават от предвижданията. Алюминиевите частици – като най-леки, образуват най-голям ъгъл на естествен откос, последвани от железните и медните, което е ясно видимо на фиг. 18.

6. Диаметър на частиците

Поради силите на кохезия при работа с частици с малък диаметър може да се наблюдава съществена разлика в ъгъла на естествен откос.

За провеждането на експериментите е използван кварцов пясък (фиг. 19) с размер на частиците, започващ от 1 mm и достигащ 0,16 mm, като общата бройка на различните фракции е шест.



Фигура 19

Отново експерименталната крива е напасната спрямо параметрите ξ и k (1), (9).

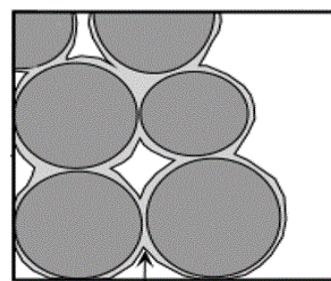
Същите експерименти са проведени и за материалите хималайска сол и глина, където резултатите отново показват ясното действие на кохезионните сили (фиг. 21, фиг. 22).

7. Влага във въздуха

Когато се работи с гранулирани материали, чиито частици са с диаметри, по-малки от 1 mm, е важно да се вземе предвид и още нещо, което може силно да повлияе на получените резултати – влажността на въздуха. В малки количества влагата във въздуха може да действа като адхезив и да залепва заедно частиците на материала (фиг. 20).

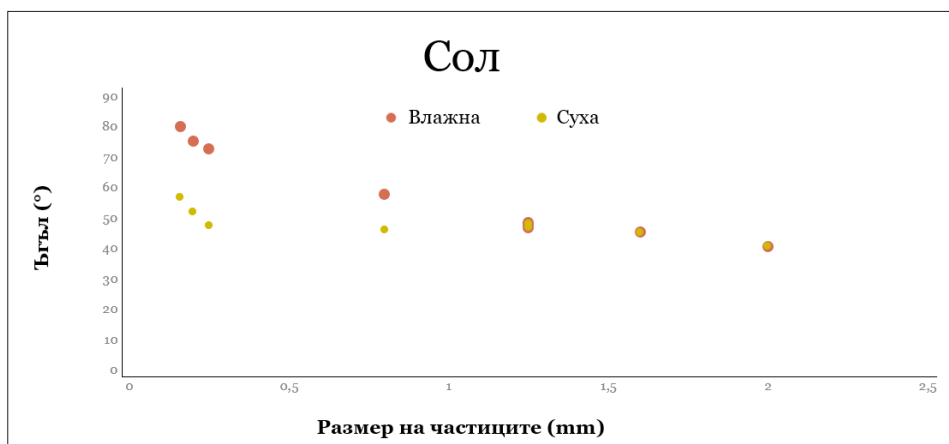
Колкото по-малък е диаметърът на частиците, толкова по-малка е и тяхната маса. Следователно по-малките частици биха се повлияли повече от влагата във въздуха, защото адхезионните сили се дължат най-вече на повърхностното напрежение на водата, поради което се образува воден слой около частиците, както е показано на (фиг. 20³⁾).

С това се съгласуват и резултатите от проведените експерименти със сол и глина (фиг. 21, фиг. 22).



Вода, действаща като адхезив.

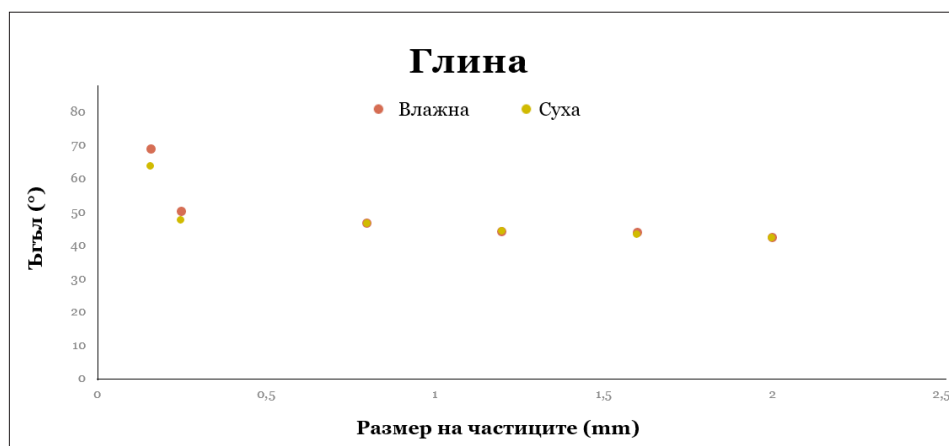
Фигура 20



Фигура 21

При тези два материала са използвани 6, 7 или 8 фракции, като най-малките частици са с големина от 0,16 mm, а най-големите достигат и до 2 mm.

При тези експерименти отново ясно може да се наблюдава ефектът, породен от силите на кохезия – както показват графиките, при намаляване диаметра на частиците ъгълът нараства.



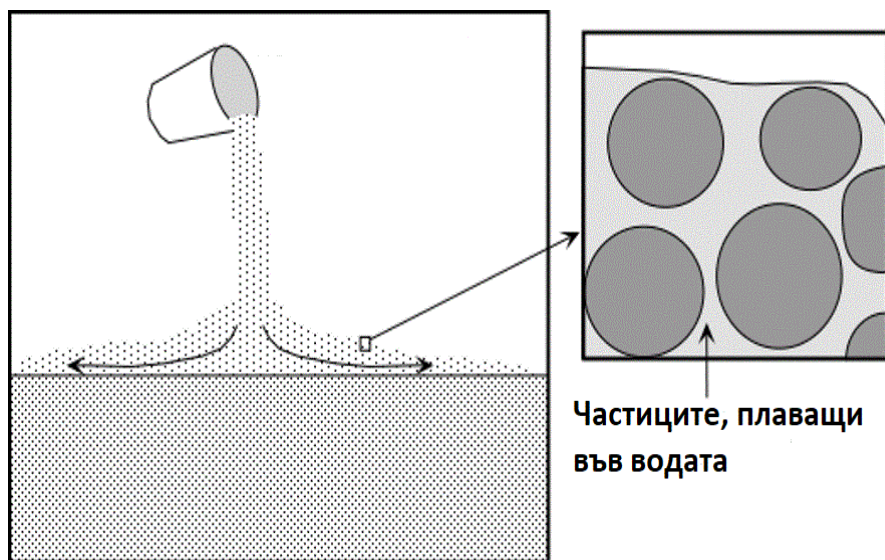
Фигура 22

От получените данни може отчетливо да се види ефектът, породен от влагата във въздуха. Поради тази причина при работа с фини прахове и частици материалът бива оставен във фурна за 5 минути с цел влагата в

материала да бъде премахната. Така се изследва истинският ъгъл на естествен откос.

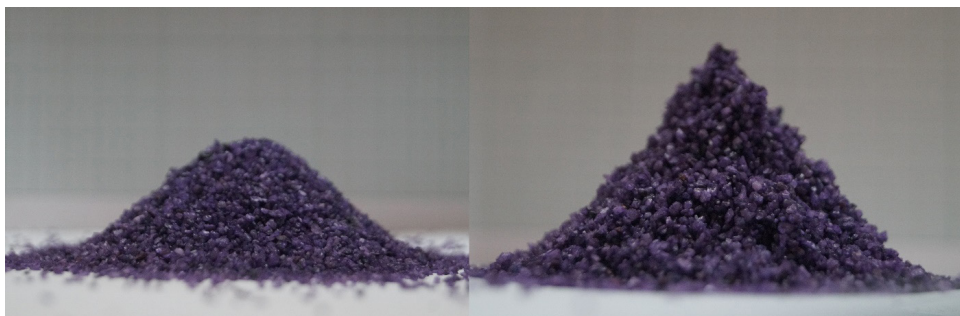
Нека сега да изследваме влиянието на допълнително добавената вода към материала. Би трябвало количеството на добавената вода да отговаря на големината на ъгъла на откос, който се наблюдава. Въпросът е докога може да продължи това, тъй като, ако има твърде много вода в материала, частиците ще започнат да плуват в нея. Последвано от това, би възникнало свлачище и ъгълът на откос би намалял (фиг. 23³⁾).

Важно е да се отбележи, че тук се споменава **ЪГЪЛ НА ОТКОС**, а не **ЪГЪЛ НА ЕСТЕСТВЕН ОТКОС**. Разликата е, че всеки ъгъл, сключен от страна на конусовидната купчина и повърхността, може да се нарече ъгъл на откос, без да се взима под внимание състоянието на материала – например наличието на влага в него, както е и в нашия случай. Ъгълът на естествен откос е ъгълът, който се наблюдава във втория етап от формирането на купчината – когато силата на статично триене се изравнява със силата, която наричаме F , и няма допълнителни сили на привличане или отблъскване, които да действат между частиците.



Фигура 23

Проведените експерименти изцяло се съгласуват с предположенията от по-рано. Като в началото се наблюдава повишаване на ъгъла, докато в един момент той не започне да намалява (фиг. 24, фиг. 25).



Фигура 24

Отляво виждаме купчинка от сух пясък, а отдясно – от мокър.

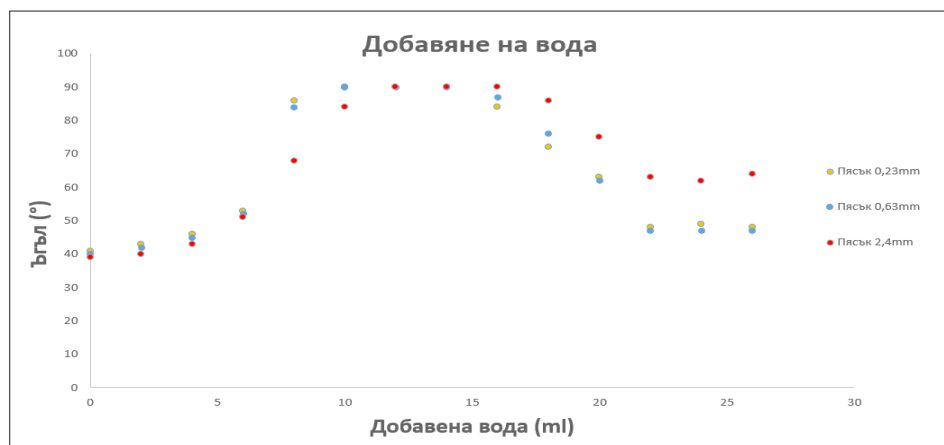
Експериментите са проведени, като към еднакви обеми от един и същ пясък се прибавя вода на интервали от 2 ml.



Фигура 25

Това са трите различни пясъка. Подредени са по големина на частиците, като вляво е този с частици с най-малък диаметър.

Експериментите са проведени с три различни пясъка (фиг. 25), които имат различни размери на частиците – 0,23 mm; 0,63 mm; 2,4 mm. Ефектът се наблюдава най-ясно при най-финия пясък (фиг. 26). Това се дължи на факта, че адхезионните сили в този случай са породени главно от повърхностното напрежение на водата (фиг. 20).



Фигура 26

Вижда се, че в даден момент ъгълът на откос достига 90° . Тези данни са измерени при участъци от купчинката, където се наблюдават вертикални спрямо земята стени. Колкото повече вода се прибавя, толкова повече се деформира и формата на конуса, което прави измерването на ъгъла на откос доста неточно. Поради този факт, грешката варира между 1 и 4 градуса. Целта на тази графика е по-скоро да илюстрира ефекта.

След прибавянето на определено количество вода ъгълът на откос започва да намалява, но не достига първоначалния естествен ъгъл на откос. Това се наблюдава поради факта, че при по-голямо количество вода тя изтича измежду частиците. Поради това пясъкът с най-голям диаметър на песъчинките не намалява толкова много след достигането на максимумът от 90° . Когато частиците са по-големи, водата изтича по-лесно и по-бързо измежду тях.

8. Смес от различни материали?

Използваните досега в експериментите материали са еднородни и монодисперсни, с други думи, техните частици са съставени от едно и също вещество и имат еднакви размери. Но какво би станало, ако два такива материала се смесят? Ъгълът на естествен откос на солта е 31° , а този на пясъка е 41° . Когато ги смесим, използвайки равни обеми от двете вещества, полученият ъгъл на естествен откос за сместа е 36° (фиг. 27).



Фигура 27

Полученият резултат е до известна степен интуитивен, тъй като е равен на средното аритметично на 31° и 41° , което е 36° . Остава въпросът дали това важи и за други смеси.

Следващият експеримент включва смесването на същата сол, но този път с пясък, чиито песъчинки са с диаметър от 2,4 mm и ъгъл на естествен откос от 40° , за разлика от първата смес, в която песъчинките са с диаметър от 0,23 mm. Ъгълът на естествен откос при втората смес е 34° . Вече наблюдаваме отклонение от средната стойност, която за тази смес е $35,5^\circ$.

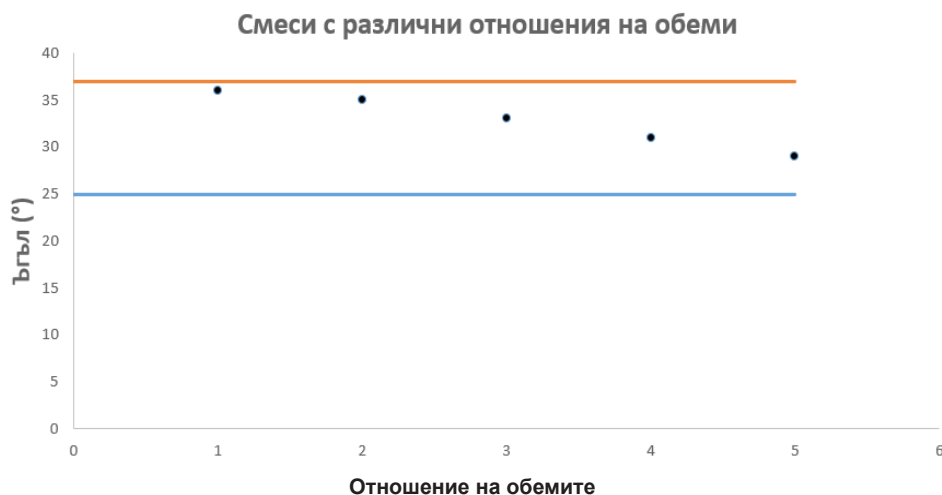
Важно е да се отбележи, че смесите са съставени от равни обеми от двете вещества. Това означава, че повече частици от материала, чиито гранули имат по-малък диаметър, ще попаднат в този обем. В такъв случай това, което определя ъгъла на сместа, е съотношението на броя на частиците от различните материали, които я образуват. Разбира се, това правило важи само за материали, които имат сравнително близки по-размер частици.

В такъв случай, какво би се наблюдавало, ако се направят смеси с различно отношение на обемите? По този начин може да се контролира съотношението между частиците на двата материала в сместа.

Използваните в следващия експеримент материали са белено просо и чия с ъгли на естествен откос 37° и 25° , респективно (фиг. 28.1 и фиг. 28.2).



Фигура 28.1



Фигура 28.2

Двете успоредни линии в тази графика обозначават естествените ъгли на откос на двата материала, които участват в сместа. По оста x е обозначено отношението между обема на чията спрямо обема на беленото просо. При увеличаването на обема на чията увеличаваме и броя на частиците $\dot{u}$ в сместа. По точките от графиката, които обозначават ъгъла на естествен откос на сместа, наблюдаваме как броят на частиците пряко влияе на образувания ъгъл. Колкото по-голямо е съотношението чия – белено просо, толкова повече ъгълът на сместа ще се доближава до ъгъла на естествен откос на чията.

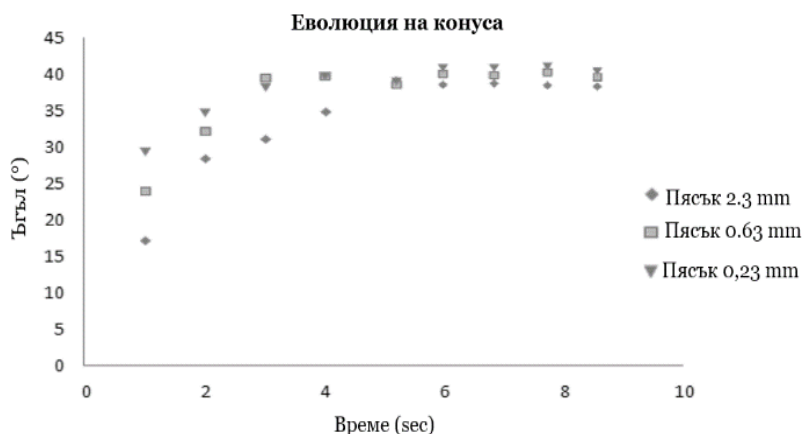
Еволюция на конусовидната купчинка

Както беше изяснено по-рано, при образуването си една конусовидна купчинка минава през четири етапа:

0. образуване на слой от частици върху повърхността;
1. растеж на купчинката и на ъгъла, който тя образува;
2. достигане на равновесно положение;
3. излизане от равновесното положение и образуване на лавини.

Етап 0 бе разгледан по-подробно в част номер 3 от експериментите. Сега ще бъдат представени по-пълно етапите от 1 до 3.

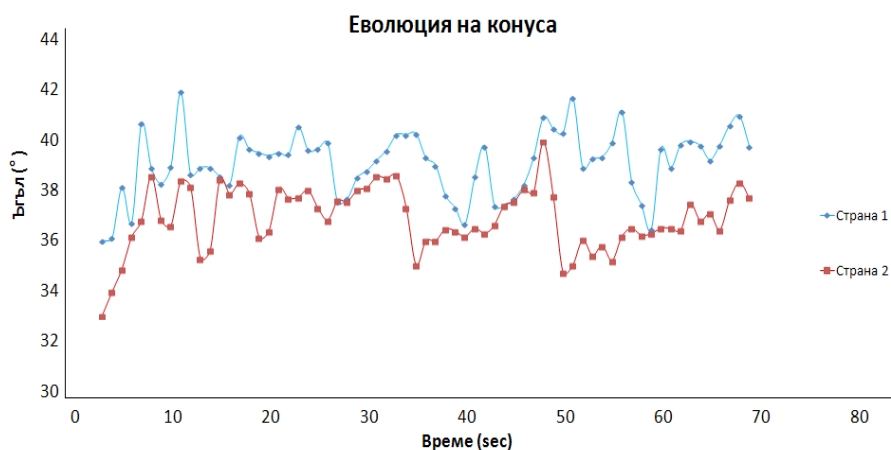
Следващите експерименти, проведени с три пясъка с различна големина на частиците (0,23 mm; 0,63 mm; 2,4 mm), ясно визуализират трите етапа от еволюцията на конусовидните купчинки (фиг. 29).



Фигура 29

При еднаква скорост на изсипване на материала се вижда, че още от самото начало най-финият пясък образува най-голям ъгъл, последван от пясъка със среден диаметър на частиците. Това се дължи на факта, че в еднакви обеми от трите пясъка има повече песъчинки в този, чиито частици са с по-малък диаметър, а продължителността на период две зависи от броя на частиците, които съставят купчинката.

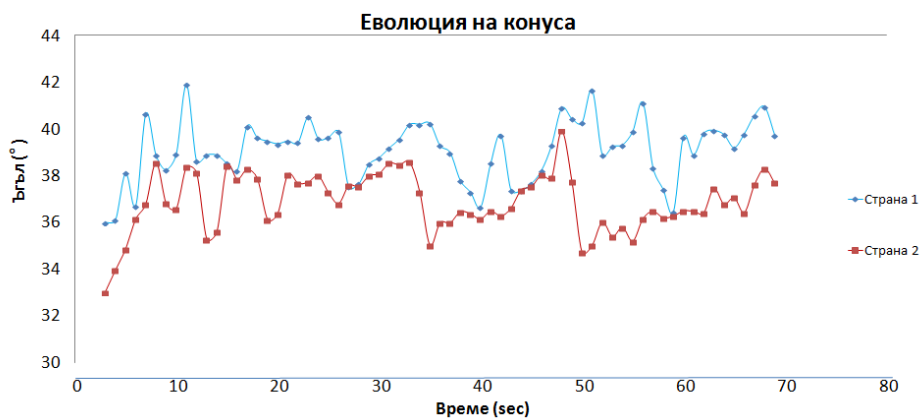
Нека сега да разгледаме по-подробно какво се случва, когато купчинката достигне ъгъла на естествен откос (фиг. 30, фиг. 31).



Фигура 30

На тази графика е показано как се променя ъгълът при две от страните на конусовидна купчинка, след като тя достигне до етапи 2 и 3 от своята еволюция. Страна 1 и страна 2 съответстват на двете страни на конуса, които са видими за наблюдател (фиг. 34).

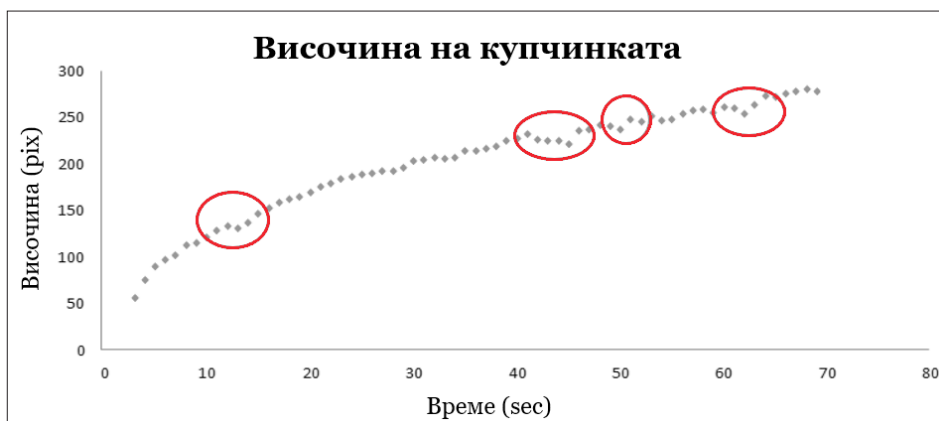
Това, което показват фиг. 30 и 31, е постоянният цикъл на преминаване от етап 2 в етап 3. Докато купчинката расте, ъгълът, който тя сключва с повърхността, достига ъгъла на естествен откос, когато тя е на ръба на своята стабилност. Ако след достигането на този ъгъл изсипването на материал продължи, купчинката става нестабилна, вследствие на това се образува лавина и ъгълът намалява. След това пак започва да расте, докато отново не достигне ъгълът на естествен откос, образува се лавина и цикълът се повтаря. Това явление се наблюдава на фиг. 30 и фиг. 31, където минимумите отговарят на ъгъла непосредствено след образуването на лавина, а максимумите – на ъгъла непосредствено преди образуването на лавина.



Фигура 31

На фиг. 31 се наблюдава още едно интересно явление. Виждаме, че ъгълът от едната страна на конусовидната купчинка е почти през цялото време по-малък от другия. Това се дължи на факта, че фунията е поставена под ъгъл в механизма за изсипване. Поради тази причина при страна 2 се изсипва повече материал в сравнение със страна 1. Това води до получаването на по-малки ъгли, както е обяснено в част 1 от експериментите.

Следи от лавини могат да бъдат наблюдавани и при изследване на височината на конусовидната купчинка по време на нейния растеж (фиг. 32).



Фигура 32

На няколко места се виждат отклонения от основната зависимост. Те отговарят на образуването на лавини.

Следи от лавините могат да бъдат наблюдавани и директно върху самата конусовидна купчинка под формата на деформация в конусовидната и форма (фиг. 33).



Фигура 33

Заклучение

Ъгълът на естествен откос е уникално свойство на всеки гранулиран материал, при изсипването на който се образува характерна купчина с конусовидна форма. Специфични за нейното формиране са четири етапа. Ъгълът на естествен откос зависи от свойствата на материала, като плътност, хомогенност и монодисперсност, както и характеристиките на отделните частици, като техния размер и форма. При измерването на ъгъла е важно да се вземат предвид всички фактори, които могат да доведат до грешка, неточни стойности или свличане на купчината, като начина на изсипване, влагата във въздуха и образуването на лавини.

БЕЛЕЖКИ

1. <https://www.istockphoto.com/vector/grain-silo-drawin gm473158218-64616975>
2. <https://www.istockphoto.com/illustrations/sand-pile?sort=mostpopular&mediatype=illustration&phrase=sand%20pile>
3. http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/slopestability.htm
4. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cohesion_\(geology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cohesion_(geology))
5. <https://en.wikipedia.org/wiki/Adhesion>
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_repose

REFERENCES

- J.T.Carstensen, Ping-Ching Chan (1976), Relation between particle size and repose angles of powders, *Powder technology*, **15**(1): 129 – 131, [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80037-X](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80037-X)

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF CONICAL PILES OF GRANULES AND POWDER

Abstract. When a granular material is poured on top of a surface, the formation of a cone-like pile is observed. This paper concerns with the factors that affect the size of the angle, that the pile makes with the ground, also known as angle of repose. The field of Physics, that investigates such phenomena is called solid granular material mechanics. The first part of this paper includes the qualitative explanation of the phenomenon, as well as some of the important reasons why we need to understand it well. The paper goes into the theoretical explanation of the

observed physical effect. The effects of the cohesion, which begin to show up when working with finer materials, were also taken into account. In the experimental part of the paper the relevant parameters are divided into two main groups- the ones that affect the size of the angle of repose and the ones that affect the formation of the cone-like pile. All of these parameters, including the formation of avalanches are well examined and fully described. The method for taking measurements and the tools that were used are also described, as well as some additional factors, that can affect the measurements.

Keywords: angle of repose; granular material; conical pile; avalanche; cohesion; adhesion; moisture

✉ **Dragni Dragnev**

ORCID iD: 0000-0002-0117-5510

Technische Universität München, Germany

21, Arcisstraße

80333 München

E-mail: dragni3.dragnev.dragnev@gmail.com