

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА НАСИПЕН МАТЕРИАЛ

Пламен Пенчев

ТУ-Габрово, Факултет „МУ“, Катедра „Енергийна Техника“, 8900 Габрово, България

e-mail: penchev_p@abv.bg

ВЪВЕДЕНИЕ

Геометричните и физични свойства на твърдите частици имат голямо и непосредствено влияние върху свойствата на флуидизираните системи, разхода на енергия за привеждане на процеса и предопределят конструкцията на разпределителната решетка и на целия сушилнен агрегат.

Геометричните свойства включват размера и формата на частиците, състоянието на тяхната повърхност и плътността на разпределението им в насипно състояние.

Най-важни физични свойства на плътността, ъгълът на естествен откос и ъгъла на външно триене в насипно състояние.

В статията са показани експериментални резултати за насипната плътност и ъглите на естествен откос, вътрешно и външно триене на дървесни трици, получени от гатер.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛТАТИ

Размер на частиците

Естественият размер, който характеризира геометрията на сферичните частици, е диаметърът. Несферичните частици се характеризират с техния еквивалентен диаметър d_e . Неговото определяне може да стане по различен начин в зависимост от формата на твърдите частици и използваният метод за измерване.

Ако са известни размерите на частицата в три взаимноперпендикулярни направления l_1 , l_2 и l_3 , то:

$$d_e = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3}, \text{ m} \quad (1)$$

Най-разпространен и лесен начин за определяне на d_e , е чрез пресяване през сит. Ако частицата е преминала през сито с размер на отворите d_2 и се е задържала върху сито с по-малък размер на отворите d_1 , то:

$$d_e = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \text{ или } d_e = \frac{l_1 + l_2}{2}, \text{ m} \quad (2)$$

За точното определяне на d_e се изисква разликата между d_1 и d_2 да е достатъчно малка.

По данни от справочната литература, за дървесни стружки получени от гатер средният

еквивалентен диаметър е $d_e \approx 4 \text{ mm}$.

Фактор на формата на частиците - Φ

Редица характерни величини на флуидизираните системи зависят в значителна степен от формата на частиците. Такива са аеродинамичните загуби в слоя, първата и втората критична скорост и др.

Колкото повече формата на частиците се различава от сферичната, както е при дървесните стружки, толкова повече специфичната повърхност е по-голяма, което в една или друга степен влияе върху взаимодействието между частицата и флуида и интензивността на процесите в слоя.

Плътност на частиците

Плътността на твърдите насипни материали биват три вида: привидна, истинска и насипна.

- Привидна плътност

Привидната плътност представлява масата на частицата, отнесена към целия обем, включително и обемът на парите, запълнени с въздух или други газове. За плътен (безпорест) материал привидната плътност е идентична с истинската.

- Истинска плътност

Плътността на дървесината се изразява чрез масата на единица обем дървесина заедно с порите и празните пространства, измерва се в kg/m^3 и има голямо значение. Основният фактор от който зависи плътността на дървесината е съдържанието на вода.

Табл. 1 Видове плътност на дървесината в kg/m^3

Вид дървесина	Плътност на материала ρ_m		Условна плътност ρ_0
	Преди сушене	След сушене	
Бреза	880	650	510
Бук	1070	720	570
Дъб	1010	690	580
Ела	980	450	390
Акация	1100	770	660
Габър	1060	830	640
Бор	650	520	430
Явор	970	630	520
Липа	680	530	420
Бреза	880	650	530

В Табл. 1 са дадени плътностите на по-важните местно растящи видове, преди и след сушенето (12% съдържание на вода). В практиката се използва още и т.нар. условна плътност, която представлява отношението на масата на дървесината в абсолютно сухо състояние към обема ѝ в сурово състояние. Тази плътност се използва при употребата на дървесината в химическата промишленост.

Поради големите различия в плътностите на различната дървесина по нататък в пресмятането ρ_0 ще се приеме средно аритметичната стойност между бор и ела:

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^2 \rho_{0i} = \frac{390+430}{2} = 410 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3)$$

- **Насипна плътност**

Насипната плътност на материала се определя от масата на частиците, които запълват съд с определен обем. Най-подходящ начин за нейното определяне е чрез градуиран цилиндър, затворен отдолу с газоразпределителната решетка.

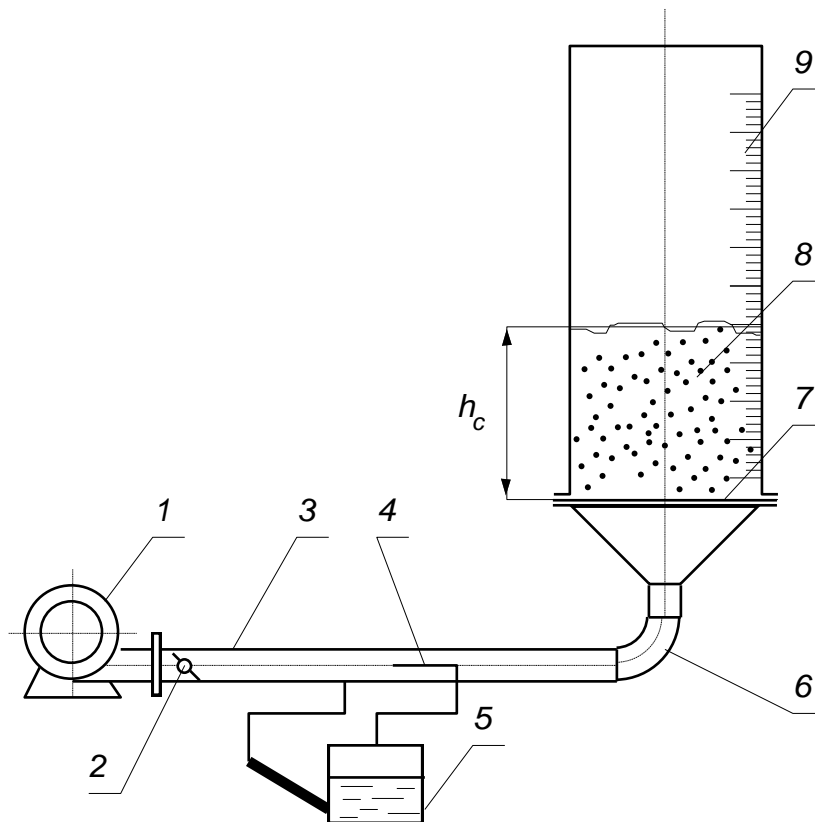
Газоразпределителната решетка е най-важният елемент на апаратите за псевдокипящ слой. Главните функции, които изпълнява са: пропускане на флуидизиращия агент в слоя с достатъчна равномерност по цялата площ и поддържане на слоя при спиране на флуидизиращия поток, като пропадането на насипния материал през нея е недопустимо. За целта относителното светло сечение на решетката φ , трябва да е в границите $2\leq\varphi\leq 10\%$.

За стенда показан на фиг. 2, $\varphi=5\%$ от общата площ на решетката, и при еквивалентен диаметър на частиците $d_e \approx 4\text{ mm}$, се приема d на отворите на решетката – $d_{отв} \approx 3\text{ mm}$.

За намиране на насипната плътност се използва стенд в лабораторията по “Топлотехника” при ТУ Габрово.

Провеждането на опита става по следния начин:

Претеглената проба от материала с маса $m=45\text{ g}$, се насипва в цилиндър 9, привежда се в кипящо състояние посредством вентилатора 1 за няколко минути, след което чрез шибъра поставен на входа вентилатора газовият поток бавно се намалява до пълно спиране. Получената дебелина на слоя се измерва за четири образувателни на градуираната тръба 9.



Фиг. 2 *Опитна уредба за определяне на насипната плътност на материала*
 1 – вентилатор, 2 – шибър, 3 – тръбопровод, 4 – дебитомерно устройство, 5 – диференциален микроманометър, 6 – коляно, 7 – разпределителна решетка, 8 – насипен

слой, 9 – градуирана цилиндрична тръба.

Обемът на насипния материал се намира като се умножи получената дебелина на слоя на напречното сечение на цилиндъра. Насипната плътност се намира по формулата:

$$\rho_n = \frac{m_q}{V}, \text{ kg/m}^3, \quad (4)$$

Където

$$V = h_c F_{\text{цил}}, \text{ - обем на насипния материал, m}^3; \quad (5)$$

$$F_{\text{цил}} = \pi \cdot d^2/4, \text{ - площ на цилиндъра m}^2 \quad (6)$$

$m_q = 45 \cdot 10^{-3}$ – претеглена маса на на частиците, използвани в експеримента, kg;

$d = 0,09$ е диаметър на цилиндъра, m;

h_c – височина на слоя, m.

За ρ_n е получена стойността **108,9 kg/m³**

В Табл. 2 са показани получените експериментални резултати за насипната плътност. където:

Табл. 2.2 Експериментални резултати от измерванията за насипна плътност

№	Дебелина на слоя $h_c \cdot 10^3, \text{ m}$				Средна дебелина на слоя, $h_c \cdot 10^3, \text{ m}$	Обем V, $\text{m}^3 \cdot 10^4$
	I	II	III	IV		
1	70	60	60	70	65	4,133
2	65	70	65	60	65	4,133
3	65	65	70	60	65	4,133

Точното определяне на ρ_n е от изключителна важност, тъй като тя е определящият фактор при изчисляване размерите на сушилната уредба.

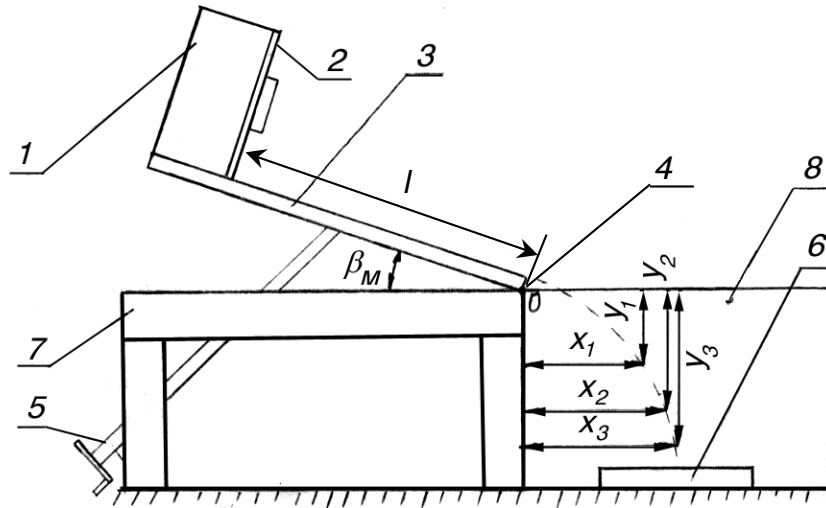
Ъгъл на естествения откос и вътрешното триене на насипния материал

- Ъгъл на естествения откос

Ъгълът на естествен откос α_m има съществено значение при работата с насипни материали. Той представлява ъгълът, сключен между хоризонталната равнина и

образувателната на конуса, получен при изсипването на материала върху него.

Достатъчно точното му измерване може да стане чрез лабораторен стенд показан на Фиг.3.



Фиг. 3 Опитна уредба за определяне на външно триене γ_m на дисперсионен материал

1 – бункер, 2 – шибър, 3 – подвижна плоча, 4 – ъгломер, 5 - винт, 6 – кутия, 7 – стойка, 8 – измерителна повърхност

За целта се използва правоъгълен бункер 1 с подвижен шибър 2 на предната вертикална стена. Измерването се извършва с ъгломер.

Материалът се изсипва в кутията при затворен шибър до ниво не по ниско от 2/3 от височината на кутията. След това шибърът се отваря бавно и без сътресения, докато долният му край излезе над материала. При това положение частиците се изсипват пред кутията, разполагайки се точно под ъгъла на естествения откос спрямо хоризонталната плоскост 3. Той се измерва удобно чрез ъгломера 4.

В таблица 3 са показани експерименталните данни получени от измерването. Както се вижда и при трите измервания стойностите за α_m не се различават особено, но заради по-голямо удобство се приема за α_m се приема една средноаритметична стойност:

$$\alpha_m = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{n}; \quad (7)$$

$$\alpha_m = \frac{32 + 25 + 28}{3} = 28^{\circ}33'$$

Табл. 3 Стойности на ъглите на естествен откос и външно триене

№	$\alpha_m, ^{\circ}$	$\gamma_o, ^{\circ}$	$x_i \cdot 10^3, m$	$y_i \cdot 10^3, m$	$\gamma_m, ^{\circ}$
1	32	42,0	62	116	41

2	25	42,0	90	150	41
3	28	41,5	100	161	35

- **Ъгъл на външно триене**

Ъгълът на външно триене е минималният ъгъл γ , при който насипният материал се свлича (плъзга) по наклонена повърхност. Той е необходим за определяне ъгъла на наклона на бункера, от който става изсипването на материала.

Неговото определяне се извършва чрез лабораторния стенд показан на фиг. 3.

Насипният материал се насипва в бункера 1 на равномерен слой с дебелина около три диаметъра на частиците, т.е. $\delta \approx 12 \text{ mm}$. Отваря се шибъра 2 и посредством винта 5, ъгълът на наклона на плочата се увеличава. Плочата 3 е шарнирно закрепена към стойката 7. Увеличаването на наклона на плочата продължава докато частиците започнат да се плъзгат без да се търкалят. Установеният по този начин ъгъл се нарича ъгъл на външно триене в състояние на покой γ_0 .

Ъгълът на триене в движение е по-малък и се пресмята по формулата:

$$\gamma_m = \arctg \left[tg \gamma_0 - \frac{x^2}{4.l.(y - x.tg \gamma_0). \cos^3 \gamma_0} \right] \quad (8)$$

където:

$l=0,42 \text{ m}$ – дължина на пътя изминат от частиците върху плочата 3 от шибъра 2 до долния ѝ край;

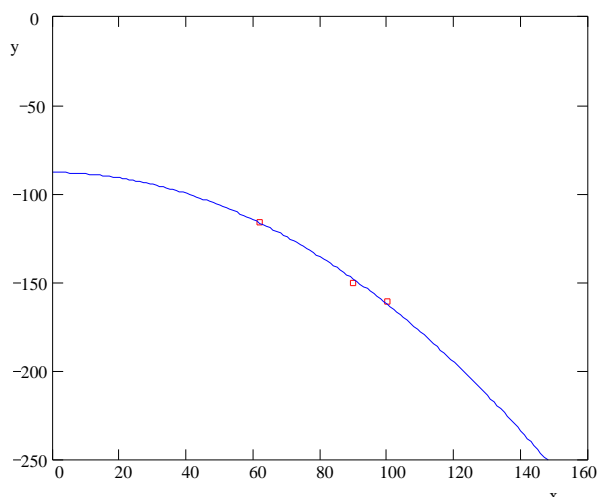
x_i и y_i – измерените координати на точки от параболата, описвана от частиците при свободното им падане, m.

Всяко измерване се прави по три пъти. Данните от експеримента са показани в Табл. 3

На Фиг. 4 е показан вида на параболата, получена при свободното падане на частиците, където т.1, т.2 и т.3 са точки с координати (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) , получени при измерването.

```

Rank 23 Eqn 4 y=a+bx2
r2 Coef Det DF Adj r2 Fit Std Err F-value
0.9951803883 0.9903607767 2.3032120819 206.48559671
Parm Value Std Error t-value 95% Confidence Limits
a -88.0285032 4.006270130 -21.9726829 -139.685143 -36.3718634
b -0.00742410 0.000516653 -14.3696067 -0.01408580 -0.00076240
Area Xmin-Xmax Area Precision
-5229.993283 2.54736e-19
Function min X-Value Function max X-Value
-162.2695214 100.00000000 -116.5668365 62.000093254
1st Deriv min X-Value 1st Deriv max X-Value
-1.484820363 100.00000000 -0.920590010 62.000093254
2nd Deriv min X-Value 2nd Deriv max X-Value
-0.014848207 78.097183967 -0.014848202 70.905214576
Soln Vector Covar Matrix
GaussJord GaussJord
r2 Coef Det DF Adj r2 Fit Std Err
0.9951803883 0.9903607767 2.3032120819
Source Sum of Squares DF Mean Square F
Regr 1095.3619 1 1095.3619 412.971
Error 5.3047859 2 2.6523929
Total 1100.6667 3
    
```



Фиг. 4 Экспериментална крива при определяне ъгъла на външно триене γ_m в движение на дисперсния материал

ИЗВОДИ

Получените резултати от изследванията за насипната плътност и ъглите на естествен откос и триене на дървесни трици са изключително важни при проектиране на нови машини и апарати с кипящ и фонтаниращ слой. Тази тема е особено актуална при разработването на сушилни уредби, които са част от линиите за производството на дървесни пелети. Тези свойства на твърдите частици имат непосредствено влияние върху характеристиките на флуидизираните системи, разхода на енергия за привеждане на процеса и предопределят конструкцията на разпределителната решетка и на целия сушилен агрегат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казакова Р.М. Конвективен топлообмен във фонтаниращ слой. Докторска дисертация, С., 1999;
2. Невенкин С., А. “Сушене и сушилна техника”, С. Техника, 1985;
3. Сендов С., “Приложение на флуидизирани системи в промишлеността”, С. Техника, 1987;
4. Tsotsas E, Mujumdar A. S., Modern Drying Technology, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011;
5. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying, 4 th Edition, CRC Press, 2015.