

УДК 632.981.2:635.13

Ялпачик В., д-р техн. наук, проф., Буденко С., канд. техн. наук, доцент, Червоткіна О., асистент (ТДАГУ)

Коефіцієнт тертя гранульованих відходів сокового виробництва

Викладені результати експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта тертя спокою і руху зразків гранульованих відходів виробництва соку моркви.

Ключові слова: відходи сокового виробництва, гранулювання відходів, коефіцієнт тертя гранул.

Постановка проблеми. Використання вторинних сировинних ресурсів сокового виробництва, наприклад, вичавків, пюре-відходів, які не втратили своєї харчової цінності, є, безумовно, актуальним і перспективним напрямком у розвитку переробної та харчової промисловості.

Як відомо, останнім часом для реалізації вказаної проблеми широко застосовують процес гранулювання, який складається з ряду послідовних етапів: стиснення, витримки під тиском, зняття тиску, релаксації напружень, витримки без тиску, випресовування і пружного розширення гранули після її вивільнення з камери. Ефективність процесу залежить від ступеня досконалості виконання кожного з названих етапів, однак основне значення має перший етап – операція стиснення порції сировини до потрібної щільності. Таким чином, вивчення чинників, які впливають на хід операції, складає завдання наведених досліджень.

Аналіз останніх досліджень. На процес стиснення суттєво впливають пружні, в'язкі і фрикційні властивості матеріалу, який піддається гранулюванню. Таким чином, ефективність процесу гранулювання переважно залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, який пресується. Це, насамперед, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнти в'язкості і тертя. Багато дослідників відмічають такі властивості як порозність, співвідношення компонентів у суміші (тверда речовина, рідина і газова фаза), точка адсорбції води на поверхні часток, критична щільність та ін. [1, 2].

Серед названих фізико-механічних властивостей особливе місце займає коефіцієнт тертя, від значення якого залежать не тільки умови і зусилля пресування, а також і спроможність готового гранульованого продукту взаємодіяти з елементами технологічного обладнання, зокрема транспортувальних та фасуваль-

них машин і механізмів.

Метою представлених результатів досліджень є експериментальне та аналітичне визначення коефіцієнта тертя спокою та тертя руху гранул з відходів (жому), одержаного в результаті виготовлення морквяного соку.

Обладнання та методика проведення експерименту. Для дослідження коефіцієнтів тертя спокою на кафедрі «Обладнання переробних і харчових виробництв» Таврійського державного агротехнологічного університету (ТДАТУ) був розроблений і виготовлений трибометр (рисунк 1) з електричною сигналізацією початку зсуву дослідного зразка, а для досліджень коефіцієнта руху модернізовано відому конструкцію приладу І.В. Крагельського [3] (рисунк 2).

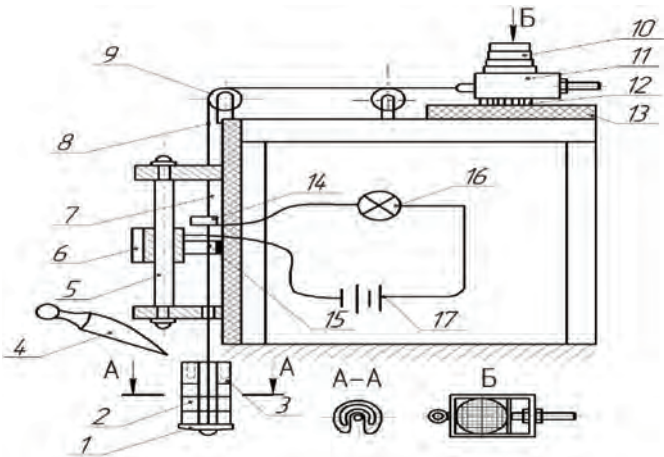


Рис. 1 – Схема дослідного трибометра

1 - підвіска; 2 - гирі; 3 - короб; 4 - совок; 5 - напрямна; 6 - повзун; 7 - рама; 8 - нитка; 9 - блок; 10 - важки; 11 - оправка; 12 - зразок; 13 - пластина; 14, 15 - контакти; 16 - лампа; 17 - батарея.

На лабораторній установці (рисунк 1) можна визначити коефіцієнт тертя спокою (f_s) як цілих плодів, так і зразків (фрагментів). Для кріплення зразків 12 крихких матеріалів та матеріалів з підвищеною пластичністю передбачалися спеціальні оправки 11.

Для імітування різних матеріалів поверхонь тертя трибометр комплектували знімними пластинами 13 з металу, дерева, гуми.

Об'єкт досліджень навантажували потрібним нормальним зусиллям F_N важками (гирями) 10.

Потім об'єкт зсувався силою F_T , яка утворювалась гирями 2 і масою піску, який плавно висипався із совка 4 у короб 3.

Гирі з коробом встановлювали на підвіску 1, яка була з'єднана ниткою 8, перекинutoю через блоки 9, з оправкою 11. Як тільки зусилля F_T перевищувало максимальне значення сили тертя, починався рух оправки або досліджуваного плоду.

При цьому закріплений на нитці рухомий контакт 14, опускаючись, торкався контакту 15, встановленого на повзуні 6. Електричний ланцюг з лампою 16 і батареєю 17 замикався.

Положення повзуна з контактом 15 на напрямній 5 фіксувалося силами тертя, яка утворювалась діями сил пружності пластинчастої пружини. Перед початком досліджуваного зазору між контактами становив 2...3 мм.

Зусилля F_T визначалося як сума сил ваги гир, підвіски і короба з піском. Зважування здійснювали вагами ВЕЛ-200.

Коефіцієнт тертя визначали із залежності:

$$f = F_T / F_N. \quad (1)$$

Плавне збільшення зусилля на дослідний зразок завдяки повільному поданню піску до короба і точному визначенню початку руху об'єкта за допомогою світлового сигналу забезпечили високу точність визначення зусилля F_T , про що говорить незначне розсіювання значень результатів повторюваних дослідів.

Для підвищення стабільності показань і спрощення керування приладом І.В. Крагельського, на якому проводили визначення коефіцієнта тертя руху, клинопасовий варіант приладу був замінений відповідною клинопасовою передачею з постійним передатним числом.

Плавне ж регулювання частоти обертання диска здійснюється за рахунок застосування електродвигуна постійного струму, під'єданого за реостатною схемою через випрямляч до звичайної однофазної електричної мережі. Регулювання частоти обертання диска у широких межах (від 200 до 1800 об/хв.) досягається шляхом змінення напруги в обмотці якоря двигуна.

Схема приладу показана на рисунку 2.

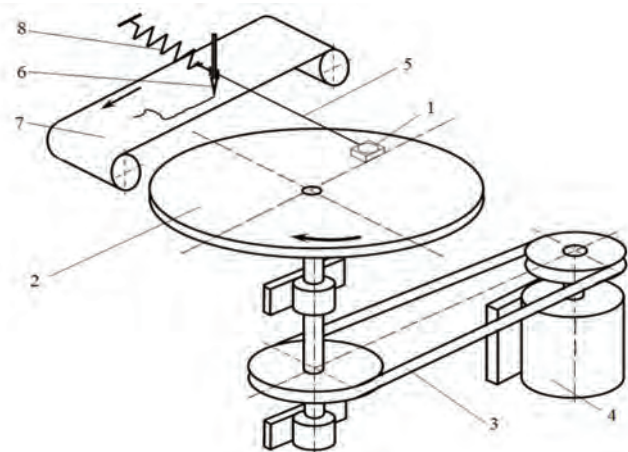


Рис. 2 – Прилад для дослідження коефіцієнта тертя руху
1 - об'єкт випробувань; 2 - диск; 3 - клинопасова передача; 4 - електродвигун постійного струму; 5 - нитка; 6 - перо самописця; 7 - вимірювальна пружина; 8 - стрічка самописця; 9 - привод самописця

Об'єкт випробування (гранула, закріплена в спеціальній оправці) 1 укладається на поверхню диска 2, який обертається навколо вертикальної площини через клинопасову передачу 3 від електродвигуна постійного струму 4. Об'єкт за допомогою нитки 5 з'єднаний з пером самописця 6, яке переміщується по стрічці 7 на відстань, обумовлену деформацією тарованої вимірювальної пружини 8. Як і у попередній серії дослідів, навантаження зразка проводили за допомогою гир, які встановлювали на зразок, закріплений в оправці.

Диск приладу має пристрої для швидкої заміни і кріплення його покриття, що імітує різні види поверхонь тертя, зокрема дерево, метал (сталь) і гума.

Запис зусилля тертя проводиться на стрічці з міліметрового паперу завширшки 50 мм. Привод само-

писця теж має безступінчасте регулювання переміщення стрічки. Це дає можливість узгодження швидкостей диска і паперу, а також одержання достовірної інформації про динаміку змінення зусилля тертя.

Досліди з визначення коефіцієнта тертя проводили з п'ятикратною повторністю, розсіювання результатів складало не більш 4...8%.

Результати досліджень. На рисунку 3 наведені графіки, побудовані за результатами визначення коефіцієнта тертя спокою.

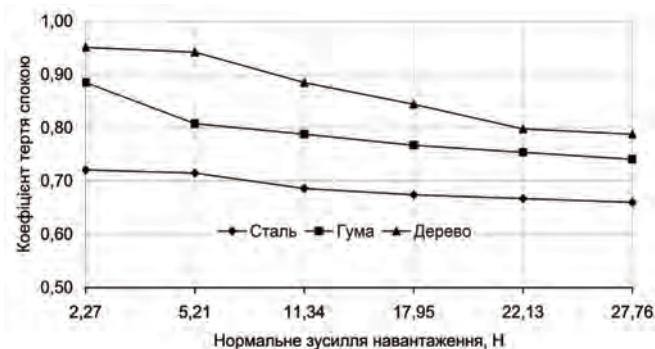


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта тертя спокою дослідної гранули жому моркви від нормального зусилля

Змінення коефіцієнтів тертя спокою, зумовлені характером проведення дослідів, можна пояснити впливом різної шорсткості поверхонь пластин трибометра та податливістю поверхні контакту, зміненнями адгезійних сил – сил молекулярного зчеплення. Вплив останніх визначається залежністю коефіцієнта тертя спокою (\$f_s\$) від величини нормального тиску. Збільшення нормальної сили тиску супроводжується тенденцією зниження коефіцієнту тертя (рисунк 3), що можна пояснити аналізом двочленного закону тертя Кулона [4].

$$F_T = F_A + F_N \cdot \mu = F_N \left(\frac{F_A}{F_N} + \mu \right) = F_N \cdot f, \quad (2)$$

де F_A - сумарна сила молекулярного зчеплення;

μ - коефіцієнт тертя за законом Кулона;

f - коефіцієнт тертя за законом Амонтона.

Таким чином збільшення нормальної сили приводить до зниження питомого зусилля F_A/F_N .

Коефіцієнт тертя руху f_p визначали за формулою Амонтона за тих же значень нормальної сили, що й для визначення коефіцієнту тертя спокою. Досліди проводились для широкого діапазону колових швидкостей руху дослідної гранули жому моркви від 2,5 м/с до 22,5 м/с. Результати дослідів показані на діаграмах рисунку 4.

Як видно з графіків, мінімальні значення коефіцієнта, одержані під час тертя по сталі, максимальні – по дереву. Як і значення коефіцієнта тертя спокою, зі збільшенням нормального зусилля тиску коефіцієнт тертя руху зменшується. З аналізу графіка б) видно, що зі збільшенням швидкості руху коефіцієнт тертя також дещо зменшується. Це явище можна пояснити зниженням питомого зусилля F_A/F_N та деяким зміненням характеру поверхонь контакту гранули і поверхні руху під час підвищення швидкості. Змінення коефіцієнта

тертя руху f_p від змінень нормального тиску F_N та швидкості ковзання не набули стабільного характеру.

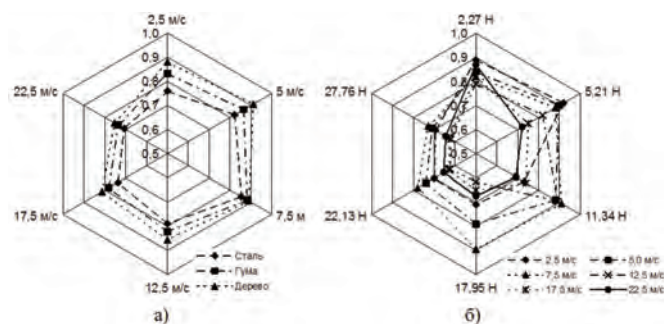


Рис. 4 – Залежності коефіцієнта тертя руху дослідної гранули жому моркви від: а) швидкості руху і б) нормального зусилля навантаження

Для аналітичного визначення коефіцієнта тертя руху застосували емпіричну залежність коефіцієнта тертя від швидкості відносно руху поверхонь, що труться [5]:

$$f_v = f_0 + f_1 v + f_2 v^2 + f_3 v^3, \quad (3)$$

де f_0 - коефіцієнт тертя за $v=0$; f_1, f_2, f_3 - експериментальні коефіцієнти, які можуть бути як позитивними, так і від'ємними.

Склавши для даних трьох швидкостей v_1, v_2, v_3 систему з трьох рівнянь (3) і, розв'язавши їх, знайдемо що:

$$f_1 = \frac{(f_{v1} - f_0)(v_2^3 v_3^3 - v_3^3 v_2^3) + (f_{v2} - f_0)(v_3^3 v_1^3 - v_1^3 v_3^3) + (f_{v3} - f_0)(v_1^3 v_2^3 - v_2^3 v_1^3)}{v_1(v_2^3 v_3^3 - v_3^3 v_2^3) + v_2(v_3^3 v_1^3 - v_1^3 v_3^3) + v_3(v_1^3 v_2^3 - v_2^3 v_1^3)} \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{(f_{v2} - f_0)(v_1^3 v_3^3 - v_3^3 v_1^3) + (f_{v1} - f_0)(v_3^3 v_2^3 - v_2^3 v_3^3) + (f_{v3} - f_0)(v_1^3 v_2^3 - v_2^3 v_1^3)}{v_1(v_2^3 v_3^3 - v_3^3 v_2^3) + v_2(v_3^3 v_1^3 - v_1^3 v_3^3) + v_3(v_1^3 v_2^3 - v_2^3 v_1^3)} \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{(f_{v3} - f_0)(v_1 v_2^3 - v_2 v_1^3) + (f_{v2} - f_0)(v_1^3 v_3 - v_1 v_3^3) + (f_{v1} - f_0)(v_2 v_3^3 - v_3 v_2^3)}{v_1(v_2^3 v_3^3 - v_3^3 v_2^3) + v_2(v_3^3 v_1^3 - v_1^3 v_3^3) + v_3(v_1^3 v_2^3 - v_2^3 v_1^3)} \quad (6)$$

Числові значення f_1, f_2, f_3 , обчислені за залежностями (4), (5), (6) і експериментальними значеннями f_{vi} на швидкостях v_1, v_2, v_3 , наведені у таблиці 1.

Тут же наведені значення f_{vi} на швидкостях v_4 і v_5 , обчислених за залежністю (3), а також знайдені експериментальним шляхом. Розрахункові значення задовільно збігаються з експериментальними.

Зазначені вище змінення коефіцієнтів тертя руху можна пояснити сукупним впливом вказаних раніше факторів (шорсткість поверхонь, піддатливість зразка, його деформація, сили молекулярного зчеплення, тощо), також додаткових факторів, як-то вплив продуктів зносу, вологості та ін.

Висновок. Наведені вище результати досліджень коефіцієнтів тертя дослідної гранули з жому моркви можна використовувати для розрахунку і проектування прес-грануляторів, транспортувальних машин та іншого технологічного обладнання.

Таблиця 1 - Результати досліджень

f_N, H	Експериментальні значення			Розрахункові значення			Значення f_{v4} за $v_4 = 7,5$ м/с			Значення f_{v5} за $v_5 = 17,5$ м/с			
	f_0	Значення f_i на швидкості			f_1	f_2	f_3	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %	Експеримент	Розрахунок	Похибка, %
		2,5 м/с	12,5 м/с	22,5 м/с									
2,27	0,885	0,89	0,79	0,871	0,00006	0,0017	-0,0013	0,821	0,795	-14,7	0,820	0,811	1,1
5,21	0,808	0,92	0,82	0,721	0,00058	-0,0078	0,0038	0,88	0,875	0,5	0,750	0,762	1,57
11,34	0,788	0,73	0,89	0,692	-0,0003	0,0068	-0,0036	0,91	0,879	1,7	0,741	0,715	3,4
17,95	0,767	0,71	0,615	0,674	-0,00022	0,0013	-0,0012	0,895	0,783	14,3	0,625	0,618	3,5
22,13	0,754	0,70	0,625	0,654	-0,00022	0,0016	-0,0007	0,78	0,768	1,5	0,632	0,60	5,3
27,76	0,741	0,694	0,621	0,645	-0,00019	0,0012	0,0005	0,729	0,720	1,2	0,630	0,602	4,6

Список літератури

- 1 Классен П. В. Основы техники гранулирования. / В. В. Классен, И.Г. Гришаев. - М.: Химия, 1982. - 272 с.
- 2 Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / С.В. Мельников. - Л.: Колос 1978. - 560 с.
- 3 Крагельский И.В. О методике определения трения скольжения несмазанных поверхностей трения и износа в машинах // Доклады и выступления. - М.-Л.: АН СССР. 1940. Т.11. - 172 с.

4 Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. / Е.П. Шведов, Д.Я. Равинский, В.Д. Зозуля, Э.Д. Браун. - К.: Наукова думка, 1979, - 188 с.

5 Крагельский И.В. Коэффициенты трения. Справочное пособие. / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова - М.: Машгиз, 1962, - 220 с.

Аннотация. Изложены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения покоя и движения образцов гранулированных отходов производства сока моркови.

Summary. The results of experimental studies to determine the static and the motion friction coefficient of carrot juice production granular waste samples are cited.

Стаття надійшла до редакції 20 грудня 2016 р.