

КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ ВІДХОДІВ СОКОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Ялпачик В.Ф. д.т.н., професор
Буденко С.Ф. к.т.н., доцент
Червоткіна О.О. асистент

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

Постановка проблеми. Використання вторинних сировинних ресурсів сокового виробництва, як-то вичавків, пюре-відходів, що не втратили своєї харчової цінності є, безумовно, актуальним і перспективним напрямком в 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 ступеню досконалості виконання кожного з названих етапів, однак основне значення має перший етап – операцію стиснення порції сировини до потрібної щільності.

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, що 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.

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 транспортуючих та фасувальних машин і механізмів.

Метою представлених 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 (при $v = 0$) на кафедрі „Обладнання переробних і харчових виробництв“ ТДАТУ був розроблений і виготовлений трибометр (рисунок 1) з електричною сигналізацією початку зсуву дослідного зразка, а для досліджень коефіцієнта руху (при $v > 0$) модернізовану відому конструкцію приладу І.В Крагельського [1] (рисунок 2).

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

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

Об'єкт досліджень навантажувався до потрібного нормального зусилля F_N важками (гирями) 10.

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

Гирі з коробом встановлювалися 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 плоду, що досліджувався.

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

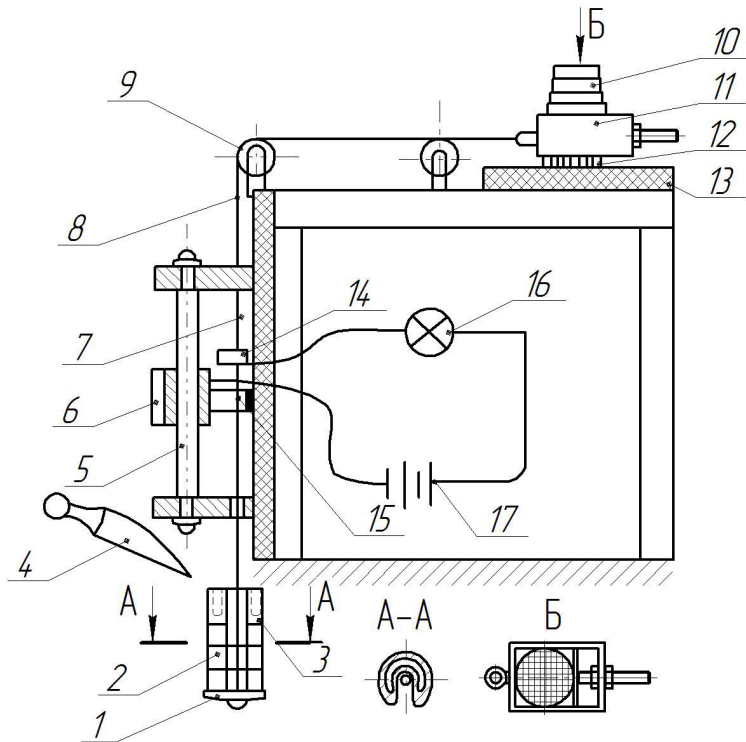


Рисунок 1 – Схема дослідного трибометра

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.

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

Зусилля F_T визначалося як сума сил ваги гир, підвіски і короба з піском. Зважування здійснювалося на вагах ВЕЛ-200.

Коефіцієнт тертя визначався за залежністю:

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

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 повторних дослідів.

Для підвищення стабільності показань і спрощення керування приладом І.В. Крагельського, на якому проводилося визначення коефіцієнта тертя руху, клиноремінний варіатор приладу був замінений відповідною клиноремінною передачею з постійним передаточним числом.

Плавне ж регулювання частоти обертання диска здійснюється за рахунок застосування електродвигуна постійного струму, підключеного 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.

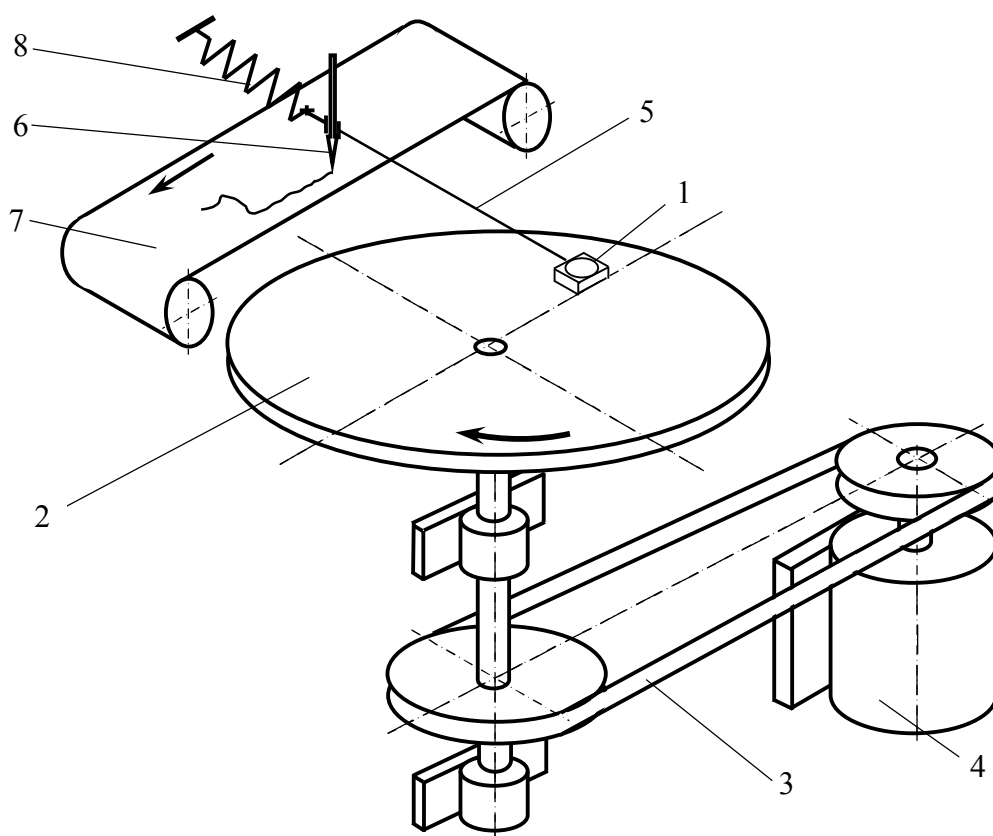


Рисунок 2 – Прилад для дослідження коефіцієнта тертя руху

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 переміщається по стрічці 7 на відстань, обумовлену деформацією тарованої вимірювальної пружини 8. Як і у попередній серії дослідів навантаження зразка проводилося за допомогою гир, які встановлювались 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 стрічку з міліметрового паперу шириною 50 мм. Привод самописця 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 по визначенню коефіцієнта тертя проводились 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.

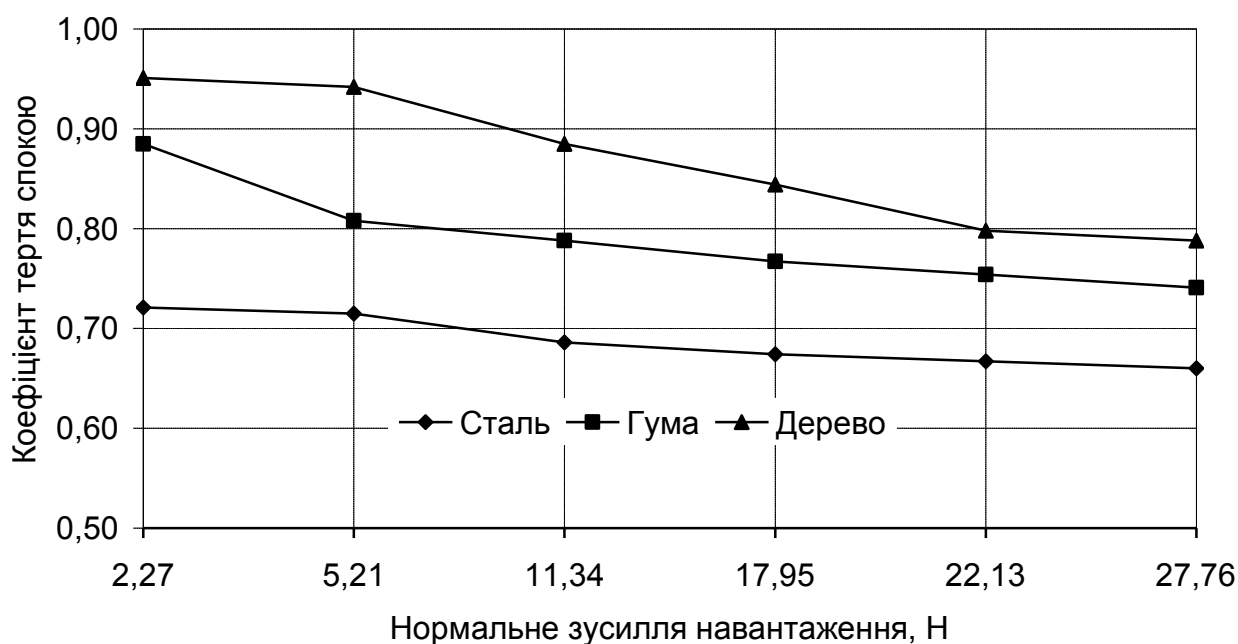


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта тертя спокою від нормального зусилля на зразок

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 f_c від величини нормального тиску. Збільшення нормальної сили тиску супроводжується тенденцією зниження коефіцієнту тертя (рисунок 3), що можна пояснити аналізом двочленного закону тертя Кулона [2].

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

Збільшення нормальної сили приводить до зниження питомого зусилля F_A/F_N (тут F_A - сумарна сила молекулярного зчеплення; μ - коефіцієнт тертя за законом Кулона; f - коефіцієнт тертя за законом Амонтона).

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

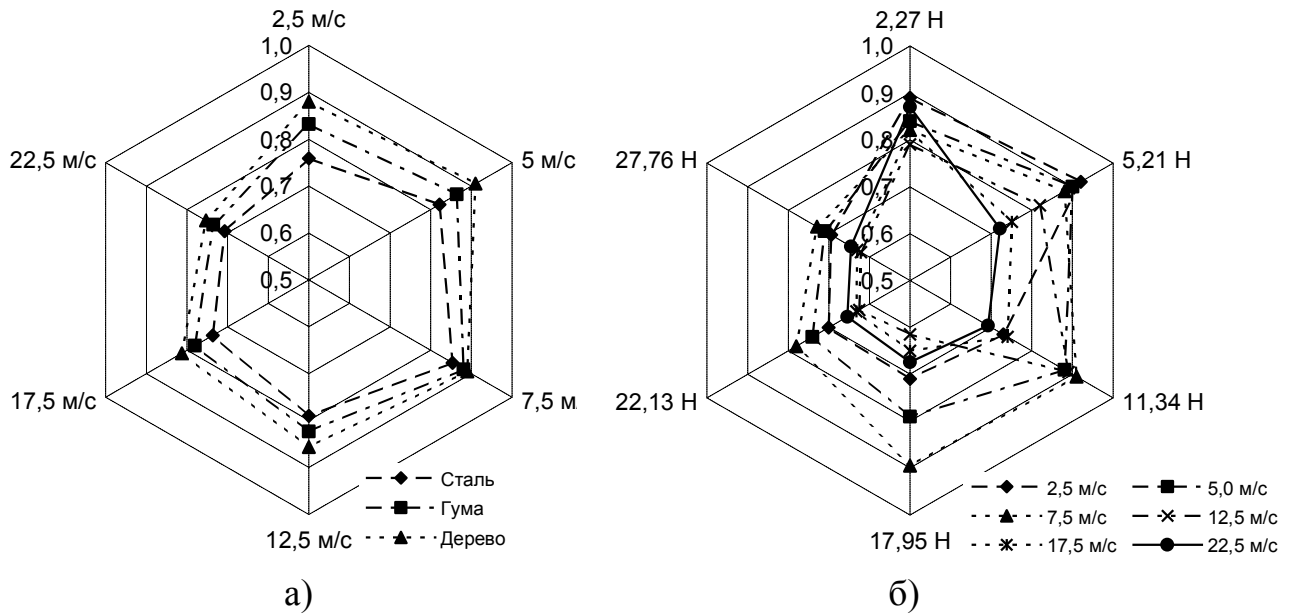


Рисунок 4 – Залежності коефіцієнту тертя руху від: а) швидкості руху і б) нормального зусилля навантаження

Як видно з графіків, мінімальні значення коефіцієнта одержані при терті по сталі максимальні – по дереву. Як і значення коефіцієнту тертя спокою зі збільшенням нормального зусилля тиску коефіцієнт руху зменшується. З аналізу графіка б) видно, що зі збільшенням швидкості руху коефіцієнт також дещо зменшується. Змінення коефіцієнта руху f_p від змінень нормального тиску F_N та швидкості ковзання не набули стабільного характеру.

Коефіцієнт граничного тертя найчастіше виражений такою емпіричною залежністю від швидкості відносно руху поверхонь, що труться [3]:

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

де f_o - коефіцієнт тертя при $v = 0$; f_1, f_2, f_3 - експериментальні коефіцієнти, які можуть 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:

$$f_1 = \frac{(f_{v1} - f_o)(v_2^2 v_3^3 - v_3^2 v_2^3) + (f_{v2} - f_o)(v_3^2 v_1^3 - v_1^2 v_3^3) + (f_{v3} - f_o)(v_1^2 v_2^3 - v_2^2 v_1^3)}{v_1(v_2^2 v_3^3 - v_3^2 v_2^3) + v_2(v_3^2 v_1^3 - v_1^2 v_3^3) + v_3(v_1^2 v_2^3 - v_2^2 v_1^3)}, \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{(f_{v2} - f_o)(v_1^2 v_3^3 - v_3^2 v_1^3) + (f_{v1} - f_o)(v_2^2 v_3^3 - v_3^2 v_2^3) + (f_{v3} - f_o)(v_1^2 v_2^3 - v_2^2 v_1^3)}{v_1(v_2^2 v_3^3 - v_3^2 v_2^3) + v_2(v_3^2 v_1^3 - v_1^2 v_3^3) + v_3(v_1^2 v_2^3 - v_2^2 v_1^3)}, \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{(f_{v3} - f_o)(v_1 v_2^2 - v_2 v_1^2) + (f_{v2} - f_o)(v_1^2 v_3 - v_1 v_3^2) + (f_{v1} - f_o)(v_2 v_3^2 - v_3 v_2^2)}{v_1(v_2^2 v_3^3 - v_3^2 v_2^3) + v_2(v_3^2 v_1^3 - v_1^2 v_3^3) + v_3(v_1^2 v_2^3 - v_2^2 v_1^3)}. \quad (6)$$

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

Таблиця 1 – Експериментальні і розрахункові значення коефіцієнтів тертя руху гранульованої моркви по гумі при різних швидкостях ковзання і різних нормальних навантаженнях

f_N , Н	Експериментальні значення				Розрахункові значення			Значення f_{v4} при $v_4 = 7,5$ м/с			Значення f_{v5} при $v_5 = 17,5$ м/с		
	f_0	Значення f_i при 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	0,00062	0,0004	-0,00006	0,821	0,884	7,12	0,820	0,796	2,93
5,21	0,808	0,92	0,82	0,721	0,044	-0,0075	0,00019	0,880	0,798	10,3	0,750	0,774	3,20
11,34	0,788	0,73	0,89	0,692				0,910			0,741		
17,95	0,767	0,71	0,615	0,674	-0,0034	0,0003	-0,00004	0,895	0,732	18,2	0,652	0,641	1,72
22,13	0,754	0,70	0,625	0,654				0,780			0,632		
27,76	0,741	0,694	0,621	0,645	-0,0087	0,0011	0,00001	0,723	0,741	2,43	0,630	0,617	2,06

Тут же наведені значення f_{vi} при швидкостях v_4 і v_5 , обчисленими 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 можна використовувати для розрахунку і проектування прес-грануляторів, транспортуючих машин та іншого технологічного обладнання.

Список літератури

1 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.

2 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.

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