

DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WALNUT WOOD IN THEIR PROCESSES EXFOLIATION

O. Negrey, A. Ukrainets

National University of Food Technologies

Key words:

*Walnut
Crushing
Mechanical
characteristics
Elasticity
Elastic modulus
Strength limit*

Article history:

Received 05.07.2019

Received in revised form
23.07.2019

Accepted 20.08.2019

Corresponding author:

O. Negrey

E-mail:

npnuht@ukr.net

ABSTRACT

The article deals with the peculiarities of the processes of crushing of walnuts, the analysis of theories of crushing of solid materials and theories of resistance of materials for their application in solving problems of synthesizing technological equipment for the implementation of such processes. The peculiarity and task of the processes of crushing of walnuts is to preserve the natural shape of the nuclei as much as possible. In this case, this problem is in conflict with the depth of shell destruction. The latter means the need to limit deformations in the destruction of a walnuts. It is concluded that energy costs for the implementation of processes are not the main ones, as is the case in theories of material crushing.

The article also addresses the theories of strength in the support of materials, which showed certain perspectives of using systems with volumetric stress states. From this point of view, the importance of moving to systems with linear loads for the estimation of the ultimate stresses and modes of elasticity of materials is shown.

The article presents the results of experimental definitions of boundary stresses, relative deformations and modulus of elasticity related to the material of shells, presents graphical and mathematical formalizations. The influence of humidity on the physical and mechanical characteristics of the shells is given. The transition to experimental studies directly with walnuts also be based on the search for the relationship between force action and deformation. In this case, the factors of influence are the absolute size of the walnuts, their shape (spherical or ellipsoidal), the thickness of the shells, the orientation of the walnuts relative to the direction of force action, humidity, etc.

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У ПРОЦЕСАХ ЇХ ЛУЩЕННЯ

О. В. Негрей, А. І. Українець

Національний університет харчових технологій

У статті наведено матеріали, які стосуються особливостей процесів лущення волоських горіхів, аналізу теорій дроблення твердих матеріалів і теорій опору матеріалів на предмет їх застосування при вирішенні задач синтезу технологічного обладнання для реалізації таких процесів. Особливістю і завданням процесів лущення горіхів є максимально можливе збереження природної форми ядер. При цьому така задача знаходиться у суперечності з глибиною руйнувань оболонок. Останнє означає необхідність обмеження деформацій при руйнуванні горіха. Зроблено висновок, що неенергетичні витрати на реалізацію процесів є головними, як це має місце в теоріях дроблення матеріалів.

Звернення до теорій міцності в опорі матеріалів показало певні перспективи використання систем з об'ємними напруженими станами. З цієї точки зору підтверджено важливість переходу до систем з лінійними навантаженнями для оцінки граничних напружень і модулів пружності матеріалів.

Наведено результати експериментальних визначень граничних напружень, відносних деформацій і модулів пружності, що стосуються матеріалу оболонок, оцінку впливів вологості на фізико-механічні характеристики оболонок, представлено графічні і математичні формалізації. Перехід до експериментальних досліджень безпосередньо з горіхами також має здійснюватися на основі пошуку залежностей між силовими діями і деформаціями. При цьому факторами впливу обрано абсолютні розміри плодів, їхня форма (сферична або еліпсоїдна), товщина оболонок, орієнтація горіхів відносно напрямку силової дії, вологість тощо.

Ключові слова: волоський горіх, лущення, механічні характеристики, пружність, модуль пружності, напруження, межа міцності.

Постановка проблеми. Механічні процеси є невід'ємною частиною значної кількості технологічних процесів харчових виробництв, в яких виникає потреба для механічного подрібнення твердих матеріалів з подальшою їх класифікацією і фізичними впливами. Умовно їх поділяють на дроблення і помел, хоча принципової фізичної різниці між ними немає.

Подрібненням називають процес руйнування складових матеріалу або окремих тіл під дією силових факторів з одержанням частинок розміром більше 5 мм. За менших розмірів дроблення процес називають помелом. При цьому і дроблення, і помел поділяють на фракції. Так, дробленню відповідають фракції: груба, середня і дрібна, помелу — груба, середня, тонка і колоїдна з відповідними діапазонами розмірів частинок [1; 2].

Зважаючи на сутність визначень понять дроблення і помелу та особливості технологічних завдань одержання лущених горіхів з руйнуванням лише

їх оболонки, приходимо до висновку про доцільність використання іншого терміну в назві цього процесу. Одночасно з цим процеси лушення горіхів складно віднести до технологій шолушіння, в яких ядра зернових культур звільняються від плодкових і насінневих оболонок [2]. Зважаючи на вищевикладене, процеси звільнення ядер горіхів від оболонок називатимемо лушенням.

На відміну від процесів дроблення, лушення горіхів має специфічне завдання максимального збереження форми і розмірів ядер плодів з подальшим їх вилученням із залишків оболонок. Це означає, що етап руйнування оболонок потребує спеціальної технології на відміну від звичайного руйнування. В самому запиті такої технології закладено вагому суперечність. З одного боку, існує необхідність якомога більшого рівня руйнування оболонок, а з іншого — мінімізація руйнування ядер. Поєднання цих вимог потребує аналізу фізичних характеристик об'єктів дослідження і вивчення досвіду синтезу машин для здійснення процесів дроблення з урахуванням сучасних теорій. Та обставина, що об'єкти дослідження являють собою жорсткі оболонки, потребує специфічних підходів у математичних моделях умов міцності. Це стосується як систем з осьовим навантаженням, так і систем з плоским і об'ємним напруженим станом.

Мета дослідження: теоретична розробка з експериментальною апробацією і доповненнями, що стосуються взаємозв'язків між силовими параметрами, деформаціями і умовами міцності, які відповідають граничним значенням у процесах лушення волоських горіхів.

Матеріали і методи дослідження поєднують в собі узагальнення, які стосуються теорій руйнування (дроблення) твердих матеріалів і теорій міцності, сформульованих в опорі матеріалів. Обидва напрямки цих теорій сформульовані більше 100 років тому і в сучасних дослідженнях не знаходять продовження та розвитку. За об'єкти наукових інтересів при цьому приймаються тверді тіла або спеціальні їх конструкції з пошуками взаємозв'язків між силовими діями і деформаціями. Теоретичне підґрунтя в цих пошуках представлено законами Гука, енергетичними співвідношеннями, умовами міцності. Відсутність вихідних даних щодо характеристик матеріалів оболонок горіхів визначає необхідність поєднання в цьому дослідженні складових теорій і експериментальних даних.

Результати і обговорення. Руйнування горіхових оболонок, як і в загальних випадках подрібнення, пов'язане з утворенням нових поверхонь під дією внутрішніх напружень, що виникають у результаті дії зовнішніх силових факторів. На першому етапі силової дії виникають тріщини, поширення яких має призвести до повного руйнування оболонки. Воно досягається за рахунок локального перенапруження поверхневих мікрооб'ємів в зонах прикладання навантажень, за наявності неоднорідностей, порожнин та інших дефектів в оболонках та за розвитку в матеріалі значних напружень і пластичних деформацій. Візуальний аналіз цілих оболонок і відокремлених їхніх частин підтверджує початкове припущення про неізотропність матеріалу. Наявність інформації щодо останньої і за умови існування їх природних закономірностей могла б забезпечити цільове спрямування в пошуках напрямків і величин силових дій для максимальних виходів цілих ядер.

До факторів впливу на результат процесів лушення відносяться такі механічні характеристики, як пружність, текучість, міцність, пластичність, модуль пружності. Важливою можна вважати інформацію щодо співвідношень між силовими діями, напруженнями і деформаціями, а нестабільні значення вологості оболонок призводять до очікування реакції системи на рівнях крихкої або пластичної. Для крихкого руйнування характерною є відсутність площадки текучості на діаграмі залежності між силовою дією і величиною деформації [3]. У випадках пластичних матеріалів має місце зона текучості. В дослідженнях подібних систем корисним є застосування енергетичних співвідношень, оскільки саме на їхній основі часто вдається поглибити рівень інформації щодо фізики явищ. Так, вважається, що за руйнування крихких матеріалів пластична деформація відсутня, а разом з нею і відповідні енергетичні витрати. За пластичних деформацій робота зовнішніх сил трансформується в теплову енергію. Оскільки крихкість і пластичність оболонок горіхів залежать від вологості, то в першому наближенні слід зробити висновок про доцільність вибору на користь технології з меншим рівнем вологості [4].

Хоча наведені узагальнення відповідають загальноновизнаним закономірностям, однак єдиної теорії руйнування не створено. Різні фізичні стани матеріалів і тіл супроводжуються, відповідно, різними моделями перебігу процесів руйнування. Так, відповідно до теорії Ріттинґера [5] енергетичні витрати пов'язані з подоланням сил молекулярної взаємодії на поверхні руйнування, тож вони пропорційні такій поверхні. Цій особливості відповідає математична формалізація у формі:

$$A_1 = K \left(\frac{1}{d_k} - \frac{1}{d_n} \right), \text{ Дж}, \quad (1)$$

де K — коефіцієнт пропорційності, що залежить від механічних властивостей матеріалів і форми частинок; d_n і d_k — відповідно, початкові і кінцеві середні розміри частинок.

Перехід до об'ємної теорії дроблення В. Л. Кирпичова (1884 р.) і А. Кіка (1885 р.) [2] передбачає зв'язок енергетичних витрат з деформацією матеріалу, яка випереджає його руйнування до рівня досягнення граничної деформації. Подальше руйнування відбувається без енергетичних витрат. Звідси випливає, що енергетичні витрати пропорційні зменшенню об'ємів матеріалу в режимі подрібнення. Відповідно до закону Гука [6] отримаємо:

$$A_2 = \frac{\sigma_p^2 \Delta V}{2E}, \text{ Дж}, \quad (2)$$

де σ_p — границя міцності матеріалу, Па; ΔV — зменшення об'єму матеріалу під час деформації перед руйнуванням, м³; E — модуль пружності матеріалу, Па.

Порівняння прикладного значення двох теорій стосовно руйнування оболонок горіхів приводить до висновку про те, що поверхнева теорія більшою мірою відповідає випадкам роздавлювання, розколювання, розтирання у

зв'язку з тим, що прикладеним навантаженням опір чинить сама оболонка. Разом з тим обидві названі теорії поєднуються теорією дроблення П. А. Ребіндера (1944 р.) [7], за якою введені енергетичні витрати поєднуються у формі суми доданків:

$$A = \sigma \Delta F + K \Delta V, \text{ Дж}, \quad (3)$$

де σ — питома поверхнева енергія, Дж/м²; ΔF — приріст поверхні, м²; K — коефіцієнт пропорційності, що дорівнює роботі, витраченій на деформацію одиниці об'єму, Дж/м³; ΔV — деформований об'єм тіла, м³.

Теорії А. Рундквіста і Ф. Бонда [2] в рамках їх припущень слід оцінювати варіантами попередніх енергетичних теорій, які однак не відповідають критеріям практичної оцінки. Це означає, що при розв'язанні задачі синтезу систем повноцінної переробки плодів горіхів перевагу слід надати експериментальним дослідженням.

Класична технологія встановлення властивостей матеріалів і конструкцій в опорі матеріалів пропонує експериментальне встановлення взаємозв'язків між силовими діями і відповідними деформаціями з переходами до залежностей між напруженнями і відносними деформаціями. Останні дають змогу одержати значення межі пропорційності, межі текучості і межі міцності. Саме досягнення останньої означає перехід матеріалу до граничного стану і подальшого руйнування. Такий перехід у загальному випадку залежить від способу навантаження. Воно може бути лінійним (одновісним), пласким і об'ємним. За випадку лінійних напружених станів їх результати визначаються безпосередньо з лабораторних досліджень у формі значень межі текучості і межі міцності. За наявності трьох головних напружень σ_1 , σ_2 і σ_3 настання граничного стану залежить від їхніх співвідношень. Важливо, що кожній з комбінацій головних напружень відповідають певні інші величини σ_1'' , σ_2'' і σ_3'' , яким відповідають більші залишкові деформації або тріщини. Однак для визначення таких доцільних значень σ_1 , σ_2 і σ_3 в лабораторних умовах необхідно мати можливість створювати різні співвідношення σ_1/σ_2 і σ_1/σ_3 . Сама по собі реалізація таких співвідношень супроводжується технічними складностями і, окрім того, потребує значних об'ємів випробувань. У зв'язку з цим доцільно знайти спосіб складання умов міцності за випадків складних напружень на основі значень межі текучості і межі міцності, визначених за лінійних напружених станів. Такому переходу відповідають теорії міцності. Перша має назву теорії найбільших нормальних напружень [8]. Відповідно до цієї теорії за умови існування трьох головних напружень при співвідношеннях $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ допустимі напруження визначаються через значення σ_1 . Звідси маємо умову міцності у формі:

$$\sigma_1 \leq [\sigma]. \quad (4)$$

Друга теорія міцності [8] стверджує, що перехід до загрозового стану настає за досягнення найбільшої відносної деформації:

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]. \quad (5)$$

Звідси

$$[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \leq [\sigma], \quad (6)$$

де μ — коефіцієнт Пуассона.

Третя теорія міцності [8] має назву теорії найбільших дотичних напружень і узагальнюється співвідношеннями:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \leq [\tau] \leq \frac{[\sigma]}{2}; \quad (7)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq [\sigma]. \quad (8)$$

Енергетична (четверта) теорія міцності [8] стверджує, що перехід до загрозливого стану пов'язується з повною питомою енергією деформації і при цьому

$$u \leq [u]. \quad (9)$$

За розтягування (стискання) отримаємо:

$$u = \frac{\sigma^2}{2E}; \quad [u] = \frac{[\sigma]^2}{2E}, \quad (10)$$

а у загальному випадку навантаження умова міцності приводиться до виду:

$$\frac{1}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)) \leq \frac{[\sigma]^2}{2E}. \quad (11)$$

Теорія змінення форми [9] стверджує, що не вся потенціальна енергія деформації є причиною переходу до граничного стану, але тільки та частина, яка пов'язана зі зміною форми:

$$u_\phi \leq [u_\phi]; \quad (12)$$

$$u_\phi = \frac{1+\mu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3). \quad (13)$$

Аналіз теорій міцності опору матеріалів показує доцільність пошуків впливів у формі складних напружених станів. Це раціонально, оскільки ідеальним рішенням задачі було б руйнування тільки оболонки з помітно обмеженою попередньою деформацією і формозміною. Проте пряме використання теорій подрібнення і умов міцності практично нівелюється анізотропними властивостями оболонок горіхів. Це означає, що єдиною можливістю у пошуках теорії і практики лущення горіхів залишаються експериментальні дослідження з визначення умов руйнування.

Експериментальні дослідження мали за мету визначення опорів розриву матеріалів оболонок, відносної деформації у зв'язку з силовим навантаженням і модулів пружності за різних значень вологості та питомої маси.

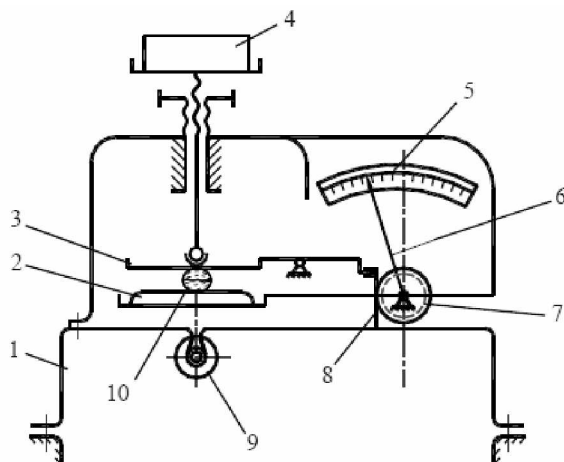


Рис. 1. Схема установки для вимірювання деформацій у випадку осевого стиснення між двома паралельними пластинами: 1 — корпус; 2 — нижня пластина; 3 — верхня пластина; 4 — вага; 5 — шкала; 6 — індикатор (показник); 7 — зубчасте колесо; 8 — кремальєра; 9 — ексцентрик; 10 — горіх

Лабораторна установка (рис. 1) дала змогу здійснювати виміри деформацій зразка (горіха) під дією стискання між двома пластинами. У корпусі 1 встановлено дві паралельні пластини 2 і 3. Шкала 5 та індикатор 6 фіксують силову дію і деформацію. Над корпусом розташована вага 4 для механічного замикання системи. Діапазон вимірів сили від 0 до 1000 Н. Реєстрація деформації оболонки здійснювалася індикатором ІС-10.

Фізико-механічні характеристики оболонок горіхів, наведені у табл. 1, підтверджують, що з підвищенням вологості границя міцності і модуль пружності зменшуються, а відносна деформація зростає. Графічна інтерпретація залежності $\sigma = \sigma(\epsilon)$ наведена на рис. 2. Стисканню підлягали частинки, вирізані з оболонок горіхів. Напруження визначалися відношенням силової дії до площі зразка.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості матеріалу оболонок горіхів у процесі їх сушіння

Вологість, $W, \%$	Щільність, $\rho, \text{кг/м}^3$	Опір розриву, $r \cdot 10^{-6}, \text{Па}$	Відносна деформація, $\epsilon, \%$	Модуль пружності, $E \cdot 10^{-8}, \text{Па}$
10	720	70,1—70,7	9,0—9,8	8,66—8,65
15	800	65,2—65,7	12,0—12,4	6,10—6,00
20	820	58,3—58,7	15,0—15,6	4,57—4,47
25	860	45,6—45,8	18,0—19,0	3,16—3,00

Початкові деформації у всіх випадках мають наближення до закону Гука, однак подальше зростання навантаження приводить до порушення лінійності. Точці В на діаграмі відповідає початок зони текучості, яка представлена ділянкою В–С–D. Наявність ділянки D–E вказує на наявність зони зміцнення, а крайні точки на діаграмах відповідають границям міцності.

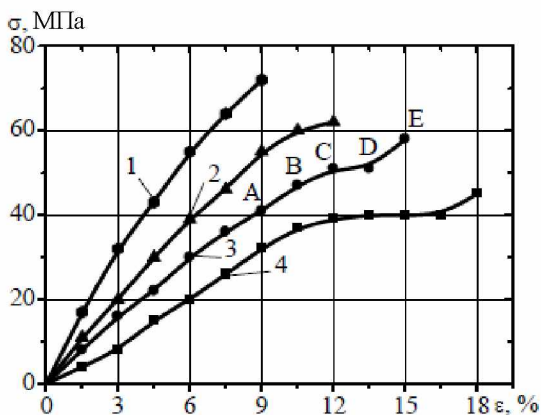


Рис. 2. Діаграми стиснення матеріалу оболонок при різних показниках вологості:
1—10; 2—15; 3—20; 4—25%

З діаграми видно помітний вплив води оболонок на фізико-механічні характеристики. Горіхи в сухому стані можуть бути віднесені до еластично-крихких структур, а у зволоженому стані більше 15% — до еластично-пластичних у зв'язку з наявністю зони текучості. На рис. 3 представлено варіації границь міцності і модулів пружності залежно від вологості. Їхні математичні формалізації мають вид:

$$\sigma_r = 65,16 - 1,23e^{w/10,58} \text{ МПа.} \quad (14)$$

$$E = 1104,84 - 155,74 e^{w/14,60} \text{ МПа.} \quad (15)$$

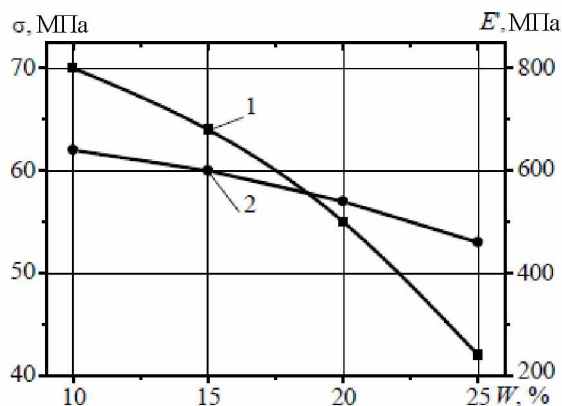


Рис. 3. Зміна опору розриву σ_r (1) і модуля пружності E (2) оболонок волоських горіхів залежно від вологості W

Результати лабораторних визначень механічних параметрів σ_r і E у зв'язку з неізотропністю матеріалів оболонок та наявністю мікроушкоджень можна вважати лише першим наближенням. Проте закономірності, пов'язані з вологістю досліджуваних матеріалів оболонок, визначають напрямки пошуку впливів на кінцевий результат. Очевидно, що вологість оболонок, ядер і

внутрішніх перегородок пов'язана з питомою масою. В дослідженнях визначалася маса 200 волоських горіхів, після дроблення яких окремо визначалися маси компонентів. Маса оболонок складала 120 г (60% від маси горіхів), маса ядер — 77 г (38,5 %) і маса перегородок — 7 г (1,5%). Початковий вміст вологи визначався методом сушіння до сталого значення маси. Кінцеві результати цієї частини досліджень узагальнені графічною залежністю на рис. 4 та математичними виразами.

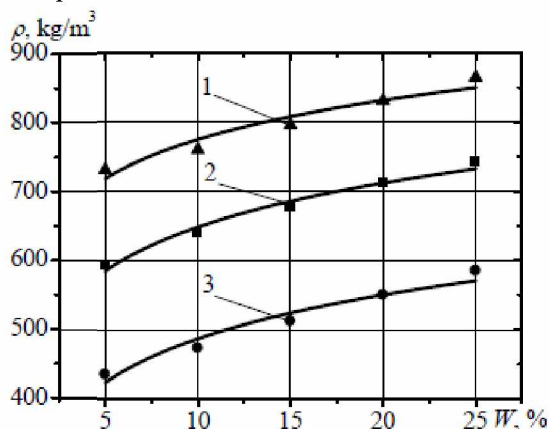


Рис. 4. Графіки залежності щільності компонентів горіха від вологості:
1 — оболонки; 2 — ядра; 3 — перегородки

Для матеріалу оболонок отримаємо:

$$\rho_{\text{об.}} = 587,23 + 81,56 \ln W, \text{ кг/м}^3; \quad (16)$$

$$\rho_{\text{яд.}} = 436,55 + 91,85 \ln W, \text{ кг/м}^3; \quad (17)$$

$$\rho_{\text{пер.}} = 275,91 + 91,56 \ln W, \text{ кг/м}^3. \quad (18)$$

Висновки

Завдання лушення волоських горіхів має принципову відмінність порівняно з процесами дроблення матеріалів. У випадку лушення руйнуванню підлягає оболонка горіха при збереженні цілісності ядра. Це означає необхідність визначення критичних рівнів деформацій у результаті силових впливів стискання. Збереження ядер цілими слід оцінювати головним завданням процесу на відміну від енергетичних витрат, на основі яких будуються теорії дроблення матеріалів.

Певною мірою більш результативними в оцінках досягнення критичних навантажень можуть бути використані теорії міцності опору матеріалів, особливо в частинах плоских і об'ємних напружених станів. Саме у створенні останніх прогноуються перспективи досягнення руйнувань оболонок горіхів за обмежених деформацій.

Визначено, що фактором впливу на граничні напруження в оболонках горіхів і на модулі пружності є вологість, варіації якої наближають процеси до умов крихкого або пластичного руйнування. В останньому випадку навіть

спостерігається наявність зон текучості на діаграмі стискання. Лабораторні дослідження і визначення фізико-механічних характеристик матеріалу оболонок оцінюються першим кроком у прогнозних оцінках умов міцності. Водночас цілісна конструкція форми оболонки має безпосередній і важливий вплив на загальний результат. Можливо передбачити, що останній залежить від розмірів плодів, їхньої форми з наближенням до сферичної або еліпсоїдної геометрії, товщини оболонок, орієнтації горіхів відносно напрямків силових дій, вологості, сорту, сезонних умов вирощування тощо.

Література

1. Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств. Москва: Агропромиздат, 1985. 503 с.
2. Технологічне обладнання зернопереробних і олійних виробництв: навчальний посібник / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздев О. В., Ялпачик Ф. Ю., Гвоздев В. О. Вінниця: Нова книга, 2008. 488 с.
3. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.
4. Справочник механика пищевой промышленности / А. И. Соколенко, А. И. Украинец, В. Л. Яровой и др.; Под ред. А. И. Соколенка. Киев: АртЭк, 2004. 304 с.
5. Инфоградия: механізм подрібнення твердих тіл (теорії подрібнення). URL: <https://infopedia.su/1x984.html> (дата звертання 04.07.2019).
6. Вікіпедія: Закон Гука. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звертання 04.07.2019).
7. Вікіпедія: Дроблення корисних копалин. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звертання 04.07.2019).
8. Вікіпедія: Теорія міцності. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звертання 04.07.2019).
9. Теорія міцності: потенціальна енергія деформації. URL: <https://studfiles.net/preview/5397474/> (дата звертання 04.07.2019).