

В.П. МІСЯЦЬ, О.В. МІСЯЦЬ  
Київський національний університет технологій та дизайну  
М.Є. СКИБА, П.Ф. ЗОЗУЛЯ, А.О. ПОЛІЩУК  
Хмельницький національний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРІЗАННЯ ТАРИ З ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФЛАТАЛУ ПІД ЧАС ЗАВАНТАЖЕННЯ В РОТОРНІ ДРОБАРКИ

*Проведено аналіз недоліків роботи роторних дробарок під час подрібнення тари з поліетилентерефталату і доцільність їх оснащення додатковим різальним пристроєм валкового типу. Представлено математичне моделювання взаємодії валків з відходами тари. Визначено умови захвату стиснених пляшок валками і визначено їх мінімальню необхідну діаметр.*

*Ключові слова: роторна дробарка, відходи тари з поліетилентерефталату, валковий пристрій, завантаження, дискові ножі, попереднє різання.*

V.P. MISIATS, O.V. MISIATS  
Kyiv National University of Technology and Design  
M.YE. SKYBA, P.F. ZOZULIA, A.O. POLISHCHUK  
Khmelnitskyi National University

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE DEVICE FOR PRELIMINARY CUTTINGS OF CONTAINER FROM POLYETHYLENE TEREPHTHALATE DURING LOADING IN THE ROTOR CRUSHER

*An analysis of the defects of the work of rotary crushers during the molding tare from polyethylene terephthalate and the expediency of their equipment with an additional cutting device of roll type have been made in this work. After the implementation of experimental studies, the design of the rotary crusher was improved by equipping it with a roller type device for deformation and preliminary cutting of used thin-walled tanks of large volume. The mathematical modelling of the interaction of rolls with packaging waste is presented. Conditions of capture of compressed bottles by rolls are determined and their minimum diameter was determined. Also in the process a deformation and cutting of the thin-walled capacities of large volume were first examined by the profiled roller mechanism with disk knives. The purpose of the research is to improve the design of the rotary crusher by equipping it with a roller device for deformation and preliminary cutting of used thin-walled tanks of large volume. The task of the work is an analytical and experimental study of the efficiency of the destruction of thin-walled capacities of large volumes by roller mechanism, and the development of its design. The object of the study is the process of crushing polymer waste in rotary crusher. The subject of the study is rotary crushers with roller loading mechanism. The methodological and theoretical basis of the study are the main provisions of the theoretical mechanics, the resistance of materials and parts of machines.*

*Keywords: the rotor crusher, wastes of container from polyethylene terephthalate, roll the device, loading, disk knives, previous cutting.*

### Мета та завдання роботи

Метою досліджень є удосконалення конструкції роторної дробарки шляхом оснащення її валковим пристроєм для деформування і попереднього різання використаних тонкостінних ємностей великого об'єму. Завданням роботи є аналітичне і експериментальне дослідження ефективності руйнування тонкостінних ємностей великого об'єму валковим механізмом та розробка його конструкції.

### Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес подрібнення полімерних відходів в роторних дробарках. Предметом дослідження є роторні дробарки з валковим механізмом завантаження відходів.

### Методи та засоби дослідження

Методологічною і теоретичною основою дослідження служать основні положення теоретичної механіки, опору матеріалів і деталей машин.

**Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.** В роботі вперше розглядається деформування і різання тонкостінних ємностей великого об'єму за допомогою профільованого валкового механізму з дисковими ножами.

### Результати дослідження

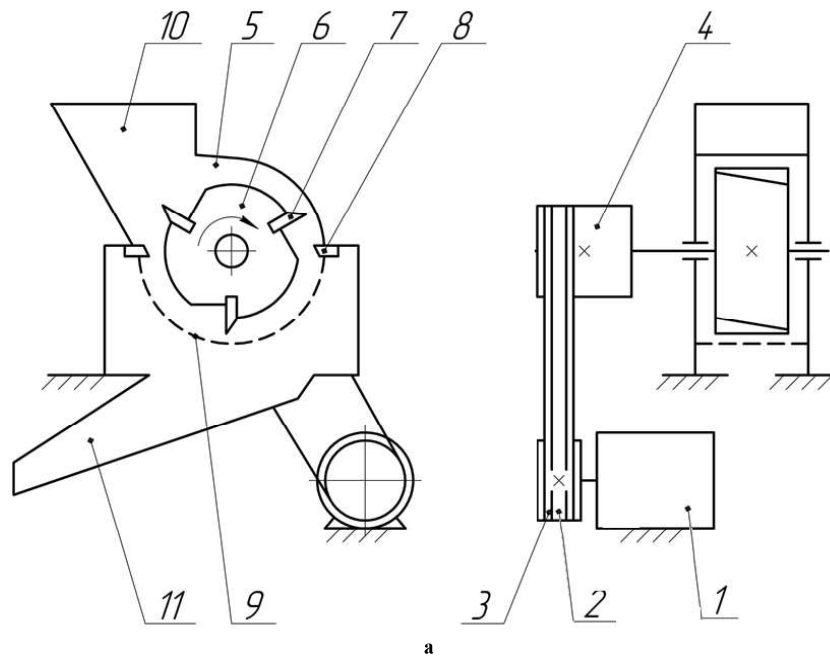
В роторних ножових дробарках [1] здійснюється зосереджене різання відходів ножами, які розташовані як в роторі, так в статорі.

Для проведення досліджень було використано роторну дробарку, кінематична схема і зовнішній вигляд якої представлені на рис. 1 та 2 відповідно.

Роторна дробарка складається (рис. 1) з корпусу 5, бункера 10, лотка 11, ротора 6 з закріпленими на ньому ножами 7, нерухомих ножів 8, закріплених на корпусі, змінної каліброваної решітки 9, розмір отворів якої задає необхідну дисперсність подрібнюваних матеріалів. Передача обертального моменту від валу електродвигуна 1 до ротора здійснюється пасовою передачею, що складається з шківів 3, маховика з шківом 4 та клинових пасів 2.

Процес подрібнення матеріалу починається з його завантаження в вікно 10, звідки він потрапляє на ротор і на його ножі. Матеріал подрібнюється при взаємодії з ножами ротора і нерухомо закріпленими

ножами статора. Після цього матеріал просіюється через решітку і потрапляє до бункера готового продукту. Даний тип подрібнювача досить широко використовується в хімічній промисловості, целюлозно-паперовій, харчовій, будівній і легкій промисловості.



**Рис. 1.** Роторна ножова дробарка: а - кінематична схема; б - зовнішній вигляд установки;  
 1 - електродвигун; 2 - клинові паси; 3 - шків; 4 – маховик з шківом; 5 – камера подрібнення;  
 6 – ротор; 7 – ножі ротора; 8 – нерухомі ножі; 9 – калібрована сітка; 10 – вікно завантаження; 11 – лоток

Під час подрібнення відходів листових полімерних матеріалів роторна дробарка має досить високу продуктивність і рівномірність роботи. Головним критерієм цих показників є правильне завантаження відходів в робочу камеру, яке здійснюється оператором вручну.

Однак, при подрібненні використаних пляшок з поліетилентерефталату виявився значний недолік процесу завантаження їх в дробарку. Ємності, потрапляючи в робочу камеру, стикаються з рухомими ножами ротора, хаотично відбиваються від них і процес їх подрібнення супроводжується затримками. Причиною є співрозмірність простору між ножами і розміром ємностей.

Нами були проведені попередні експерименти [2], в ході яких визначався час подрібнення пляшок ємністю 2 л при послідовному безперервному завантаженні. Експерименти показали, що при завантаженні пляшок, що розрізані, повздовж на три частини продуктивність подрібнення в 5...6 разів вища ніж при завантаженні цілої тари.

В результаті експерименту було зроблено висновок про доцільність оснащення дробарки валковим пристроєм для деформування і попереднього різання використаних пляшок, який повинен бути встановлений на вході в робочу камеру.

Схема пристрою представлена на рис. 2. Він складається з двох валків, які профільовані таким чином, що в середній частині можливий надійний захват горловин ємностей з причини їх достатньо великої товщини і жорсткості.

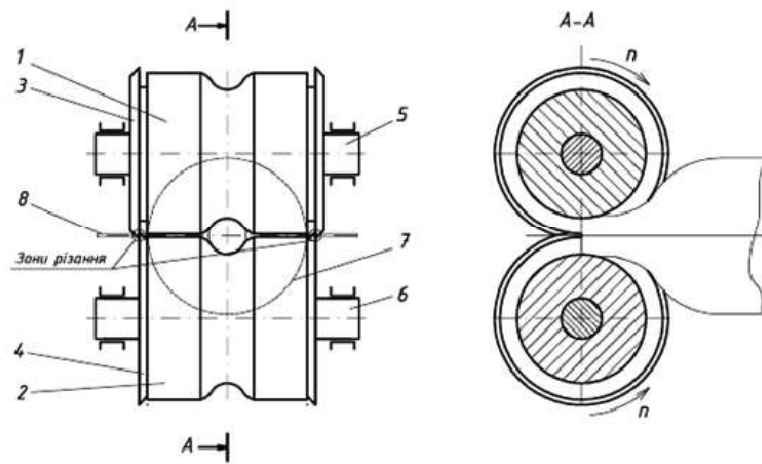


Рис. 2. Схема валкового пристрою для деформування і попереднього різання використаних тонкостінних смістей при завантаженні в роторну дробарку: 1, 2 – профільовані валки; 3, 4 – пари дисків ножів; 5, 6 – вали; 7 – смість в недеформованому стані; 8 – смість після стиснення в міжвалковому зазорі

На торцевих поверхнях валків закріплено дві пари дисків ножів 3 і 4, які після деформування тонкостінної частини смістей валками розрізають її на три частини. При подачі розрізаних частин в робочу камеру дробарки інтенсивність процесу подальшого подрібнення значно зростає.

Запропонована конструкція валкового пристрою потребує аналітичного дослідження ефективності її роботи і експериментального підтвердження.

Розглянемо умови захоплення матеріалу (пляшок з ПЕТФ) валками. За рахунок поступального руху матеріалу і неминучої шорсткості контактних поверхонь пляшок і валів за певних умов матеріал захоплюється валками і втягується в простір між валками.

Центральний кут між лінією, що сполучає центри валів, і радіусом, що проходить через точку зіткнення контактуючої поверхні матеріалу з валами, носить назву кута захоплення. При цьому з боку валів діють нормальні і дотичні сили, прикладені до матеріалу через його контактуючі поверхні.

Визначимо умову захоплення матеріалу валками в початковий момент транспортування. На матеріал, що контактує з валками в початковий момент, діють сили нормального тиску  $N$  і сили тертя  $F_1$ ,  $F_2$  (рис. 3а).

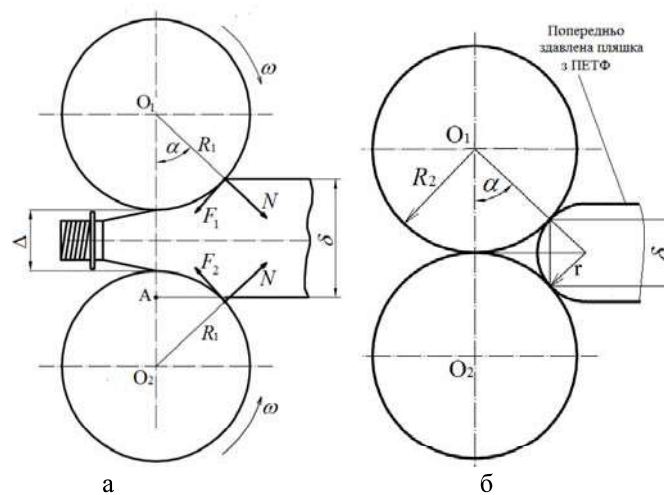


Рис. 3. Схеми взаємодії пляшок з ПЕТФ з валками: а – в центральній частині; б – в зонах стиснення

Спроектуємо вектори діючих сил на вісь  $X$  і отримаємо умову захоплення матеріалу валками:

$$(F_1 + F_2) \cos \alpha > 2N \sin \alpha, \tag{1}$$

де  $\alpha$  – кут захоплення матеріалу валками;  $N$  – нормальна сила тиску валків на матеріал;  $F_1$ ,  $F_2$  – сили тертя між валками і матеріалом.

За умови однакових поверхонь валків і умов їх контактування з матеріалом  $F_1 = F_2 = F_{тер}$ .

$$F_{тер} = N \cdot f, \tag{2}$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя матеріалу об поверхні валків.

Враховуючи (2), з (1) отримуємо умову захоплення матеріалу валками в початковий момент транспортування:

$$\operatorname{tg} \alpha < f. \quad (3)$$

Згідно зі схемою на рис. 3а можна записати рівняння:

$$R_1 + \frac{\Delta}{2} = R_1 \cos \alpha + \frac{\delta}{2}.$$

Звідси

$$\Delta_{\min} = \delta - 2R_1(1 - \cos \alpha). \quad (4)$$

Зі схеми на рис. 3а видно, що

$$AO_2 = R_1 - \frac{\delta - \Delta}{2}, \text{ або } AO_2 = R_1 \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

З (4) і (5) маємо:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\delta - \Delta}{2R_1}. \quad (6)$$

Представимо  $\operatorname{tg} \alpha$  у вигляді:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Враховуючи вираз (6), формула (7) приймає вигляд:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\delta - \Delta}{2R_1}\right)^2}}{1 - \frac{\delta - \Delta}{2R_1}}. \quad (8)$$

Введемо позначення  $\frac{\delta - \Delta}{2R} = x$  і перепишемо (8) з урахуванням (3) у вигляді:

$$f = \frac{\sqrt{1 - (1 - x)^2}}{1 - x}. \quad (9)$$

Виконуємо алгебраїчні перетворення виразу (9) і отримуємо рівняння:

$$(1 + f^2)x^2 - 2(1 + f^2)x + f^2 = 0. \quad (10)$$

Рішенням отриманого квадратного рівняння (10) є:

$$x_{1,2} = \frac{1}{2} \left( 1 \pm \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right). \quad (11)$$

Нас задовольняє рішення (11), при якому точки дотику матеріалу знаходяться в середній частині валків (як на рис. 3а), тобто зі знаком «мінус». Підставляємо в (11) замість  $x$  його значення і отримуємо після перетворень:

$$R_1 = \frac{\delta - \Delta}{\left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right)}. \quad (12)$$

Отримана нами формула (12) дозволяє визначити мінімальний радіус валків, який забезпечує умову захоплення матеріалу, при відомих значеннях його початкової товщини  $\delta$ , зазору між валками  $\Delta$  і коефіцієнта тертя  $f$ .

У випадку початкового контакту валків і пляшки, яка попередньо стиснена до товщини  $2r$  (рис. 3б), величина  $\delta$  може бути знайдена за схемою на рис. 3б і виражена формулою:

$$\delta = \frac{2r \cdot R_2}{r + R_2}. \quad (13)$$

Оскільки  $\Delta \ll \delta$ , для спрощення вважаємо  $\Delta = 0$ , тоді формула (12) з урахуванням (13) приймає вигляд:

$$R_2 = \frac{2r}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+f^2}}\right)} - r. \quad (14)$$

Коефіцієнт тертя поліетилентерефталату по сталі залежить від стану контактних поверхонь і має значення  $f=0,5\dots0,7$ .

На рис. 4 представлено графік залежності мінімально необхідного радіуса валків для захоплення ними пляшок з ПЕТФ від  $r$  і коефіцієнту тертя, який отримано за формулою (14).

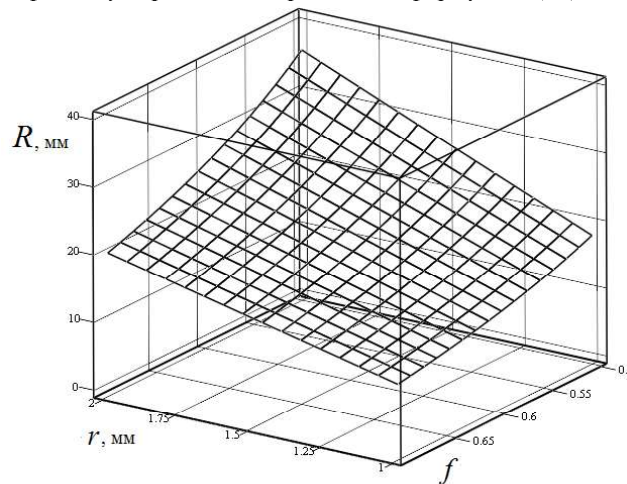


Рис. 4. Графік залежності мінімально необхідного радіуса валків для захоплення ними пляшок з ПЕТФ від  $r$  і коефіцієнту тертя  $f$

Згідно з графіком можна зробити висновок, що захоплення навіть майже повністю стиснених пляшок гладкими валками (коли  $r_{пл} = 1$  мм) гарантовано можливе при  $R > 20$  мм.

В подальших дослідженнях потрібно виконати математичне моделювання процесу різання стиснених пляшок дисковими ножами та визначити конструктивні і енергетичні параметри всього пристрою.

#### Висновки

У роботі проведено аналіз недоліків роботи роторних дробарок при подрібненні тари з поліетилентерефталату і доцільність їх оснащення додатковим різальним пристроєм валкового типу. Представлено математичне моделювання взаємодії валків з відходами тари. Визначено умови захвату стиснених пляшок валками і визначено їх мінімально необхідний діаметр.

Також в роботі вперше розглядається деформування і різання тонкостінних ємностей великого об'єму за допомогою профільованого валкового механізму з дисковими ножами.

#### Література

1. Рубанка М. М. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2016. – № 1 (94). – С. 27–36.
2. Місяць В. П. Удосконалення роторної дробарки для подрібнення використаної тари з поліетилентерефталату / В. П. Місяць, О. В. Місяць // Тези Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія та технології: наука, освіта, виробництво», м. Луцьк, 15-16 листопада 2018 р. – С. 168–169.

#### References

1. Rubanka M. M. Eksperymentalni doslidzhennia dynamiky rotornoj drobarky dlia pererobky vidkhodiv lehkoj promyslovosti / M. M. Rubanka, V. P. Misiats // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dizainu. – 2016. – № 1 (94). – S. 27–36.
2. Misiats V. P. Udoshkonalennia rotornoj drobarky dlia podribnennia vykorystanoi tary z polietylenterefalatu / V. P. Misiats, O. V. Misiats // Tezy Mizhnarodnoj naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Inzheneriia ta tekhnolohii: nauka, osvita, vyrobnytstvo», m. Lutsk, 15-16 lystopada 2018 r. – S. 168–169.

Рецензія/Peer review : 13.11.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.12.2018 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Кармаліта А.К.