

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ CHẾ TẠO MÁY NGHIÊN TRỤC CHẤT THẢI RẮN TỪ TẮM PIN MẶT TRỜI

RESEARCH ON THE DESIGN AND FABRICATION OF A SHAFT CRUSHER FOR SOLAR WASTE FROM SOLAR PANELS

Nguyễn Đình Tùng

Trường Đại học Công nghiệp Việt - Hung

Email liên hệ: nguyendinh tung@vnu.edu.vn

TÓM TẮT

Chất thải rắn từ tấm pin năng lượng mặt trời ngày thải ra càng nhiều trên thế giới, trong đó có Việt Nam. Tổng cộng, đến năm 2050, ước tính sẽ có 78 triệu tấn nguyên liệu thô được tích hợp trong khối lượng các mô-đun quang điện (PV) hết hạn sử dụng. Với lượng chất thải lớn như vậy, việc nghiên cứu, tìm hiểu công nghệ và xây dựng, thiết lập sơ đồ quy trình công nghệ, thiết bị để lựa chọn đưa ra được một công nghệ phù hợp với điều kiện Việt Nam là cần thiết. Ngoài ra cần nghiên cứu xác định được nguyên lý kết cấu một số thiết bị chính trong hệ thống dây chuyền là một trong những yếu tố quyết định đến hiệu quả làm việc của dây chuyền sau này, trong đó có máy nghiền (thiết bị làm nhỏ). Bởi vậy, nội dung bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế chế tạo máy nghiền trục/ngiễn lô chất thải rắn từ tấm pin mặt trời. Kết quả nghiên cứu là một triển vọng lớn đưa ra thị trường Việt Nam một trong những “mẫu” thiết bị được nghiên cứu thử nghiệm nhằm đáp ứng được yêu cầu của thị trường tiềm năng mà không cần nhập khẩu từ Trung Quốc, Hàn Quốc, Cộng hòa Liên bang Đức, Kết quả nghiên cứu bước đầu xác định được các thông số chính đối với “mẫu” máy ban đầu với các thông số: chiều dài trống L (600mm); đường kính lô trống D (400mm); số vòng quay n (1400v/ph); công suất lý thuyết N (5,5 kW). Với quy mô công suất như vậy hoàn toàn có thể ứng dụng vào các cơ sở xử lý môi trường được cấp phép ở quy mô công nghiệp.

Từ khóa: Tấm pin mặt trời thải; Nghiền tấm pin năng lượng mặt trời; Nghiễn lô/trống.

ABSTRACT

Solid waste from solar panels is increasing worldwide, including in Vietnam. By 2050, it is estimated that 78 million tons of raw materials will be integrated into the volume of photovoltaic (PV) modules that have reached the end of their lifespan. Given this large amount of waste, research into technology and the development and establishment of process flow diagrams and equipment to select a technology suitable for Vietnamese conditions is essential. Furthermore, research is needed to determine the structural principles of some key components in the production line, which are crucial to the line's efficiency, including the shredder (a device for reducing the size of the material). Therefore, this paper presents the results of research on the design and fabrication of a shaft shredder for solid waste from solar panels. The research results present a great prospect for bringing to the Vietnamese market a “model” of equipment that meets the requirements of the potential market without needing to import from China, South Korea, the Federal Republic of Germany, etc. The research results determined the main parameters for the initial “model” machine with the following parameters: drum length L (600mm); drum diameter D (400mm); rotational speed n (1400rpm); theoretical power N (5.5kW). With such a power scale, it can be fully applied to licensed industrial-scale environmental treatment facilities.

Keywords: Waste solar PV panels; Solar panel crushing; Roller/drum crushing.



1. MỞ ĐẦU

Sự phát triển toàn cầu của việc triển khai công nghệ năng lượng sạch chắc chắn sẽ kéo theo sự gia tăng song song của các sản phẩm hết hạn sử dụng, mang lại cả thách thức và cơ hội.

Tổng cộng, đến năm 2050, ước tính sẽ có 78 triệu tấn nguyên liệu thô được tích hợp trong khối lượng các mô-đun quang điện (PV) hết hạn sử dụng. Một phần do lo ngại rằng sự tăng trưởng dự kiến của các công nghệ năng lượng sạch có thể bị hạn chế bởi sự khan hiếm nguyên liệu thô, bất chấp những nỗ lực giảm thiểu vật liệu đang diễn ra, sự chú ý đáng kể dưới khuôn khổ kinh tế tuần hoàn đã được dành cho việc tái chế các công nghệ này khi hết hạn sử dụng. Tuy nhiên, PV chưa được thiết kế để phục vụ cho việc tái chế khi hết hạn sử dụng, và điều này đặt ra thách thức trong việc đưa các nguyên liệu thô tích hợp trở lại sử dụng trong các sản phẩm mới thông qua tái chế. Nghiên cứu này nhằm mục đích cung cấp thông tin cho các thiết kế trong tương lai để cải thiện khả năng tái chế thông qua việc tổng hợp các công trình đã được công bố trước đây, được bổ sung bởi các khuyến nghị mới, dẫn đến một bộ hướng dẫn thiết kế chung cho việc tái chế, cụ thể là dành cho các mô-đun PV.

Trong nền kinh tế tuyến tính truyền thống, các sản phẩm thường được chôn lấp khi hết vòng đời, và các sản phẩm mới từ nguyên liệu thô được sản xuất để thay thế chúng. Ngược lại, nền kinh tế tuần hoàn tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng và vật liệu trong suốt vòng đời sản phẩm bằng cách tái sản xuất, tân trang, sửa chữa, tái sử dụng và tái chế các sản phẩm hết vòng đời, và/hoặc kéo dài tuổi thọ ban đầu của sản phẩm để tăng lượng dịch vụ hữu ích trên mỗi sản phẩm; khi sản phẩm không thể được tái sản xuất, tân trang, sửa chữa hoặc tái sử dụng

nữa, tái chế là lựa chọn tuần hoàn cuối cùng. Tuy nhiên, nhiều sản phẩm bao gồm một hỗn hợp phức tạp các vật liệu khó thu hồi trong quá trình tái chế. Một cách tiếp cận để đưa những sản phẩm như vậy vào nền kinh tế tuần hoàn là thiết kế chúng ngay từ đầu với mục tiêu tái chế. Thiết kế cho tái chế nhằm mục đích tạo điều kiện thuận lợi cho việc tái chế kinh tế và tối đa hóa việc thu hồi vật liệu bằng cách thiết kế sản phẩm tập trung vào việc tăng tốc độ và sự dễ dàng tháo dỡ, cải thiện tỷ lệ tái chế và độ tinh khiết của vật liệu thu hồi, và giảm thiểu chất thải. Tái chế/tái tạo tập trung vào việc sản xuất các sản phẩm có thể được tái chế một cách an toàn và tiết kiệm, bằng cách sử dụng công nghệ và phương pháp tái chế “phù hợp”, khi ngừng sử dụng cũng như thay thế vật liệu để có được các sản phẩm an toàn hơn cho môi trường và con người. Tuy nhiên, trong một số trường hợp, việc thay thế các thành phần nguy hiểm hoặc hiếm gặp cụ thể có thể không khả thi. Trong những trường hợp này, sự hợp tác giữa các nhà sản xuất và các đơn vị tái chế là rất quan trọng để đảm bảo việc tái chế và kiểm soát các rủi ro môi trường phát sinh [1].

Trên thế giới hiện nay, công nghệ tái chế/xử lý tấm pin năng lượng mặt trời với các quy trình tái chế tấm pin đang được phát triển và thử nghiệm trên toàn thế giới. Với các công nghệ hiện có, vật liệu thu hồi thường không đủ tinh khiết để sử dụng lại một cách hiệu quả. Các công nghệ mới vẫn đang được triển khai nghiên cứu [2].

Việc tái chế tấm pin đang đối mặt với một thách thức lớn: phá vỡ các thành phần tấm pin, vốn được liên kết chặt chẽ với màng nhựa trong quá trình sản xuất, và thu hồi các vật liệu chứa trong đó với độ tinh khiết cao. Các quy trình thông thường dựa vào việc cắt nhỏ và phân loại, bên cạnh việc tháo rời tương đối đơn giản các hộp nối và khung nhôm. Các quy trình

hiệt hoặc hóa học cũng được sử dụng, đôi khi thậm chí là kết hợp với các phương pháp khác. Các nguyên liệu thô có giá trị như bạc và silicon, vốn chỉ chứa một lượng nhỏ trong các tấm pin, năng lượng mặt trời, không thể được khai thác một cách kinh tế bằng các quy trình hiện có [2].

Nhưng điều này sẽ không còn đúng nữa – các nguyên liệu thô này quá quý giá, đặc biệt là khi chúng sẽ được cần đến với số lượng lớn trong những năm và thập kỷ tới do sự phát triển của quang điện trên toàn cầu. Hơn nữa, các yêu cầu về tái chế dự kiến sẽ được điều chỉnh. Hạn ngạch tái chế theo quy định công nghệ hiện đại của “thế giới” rất dễ dàng đáp ứng bằng cách tách riêng khung nhôm và cáp. Trong tương lai, hạn ngạch có thể được áp dụng cho từng thành phần - ví dụ, khi đó một phần silicon hoặc bạc cũng sẽ phải được xử lý cho các ứng dụng mới [2]. Để góp phần nâng cao hiệu quả tái chế và tỷ lệ thu hồi các nguyên liệu có giá trị, công đoạn làm nhỏ giữ vai trò quan trọng, bởi vậy việc nghiên cứu xác định được nguyên lý kết cấu và các thông số của máy móc, thiết bị rất có ý nghĩa về kỹ thuật và kinh tế. Với lý do đó, trong nghiên cứu này đề cập đến nội dung nghiên cứu thiết kế chế tạo máy nghiền trục lăn chất thải rắn từ tấm pin năng lượng mặt trời nhằm xác định được các thông số kỹ thuật chính và đưa ra được thị trường “mẫu” máy phù hợp với điều kiện Việt Nam.

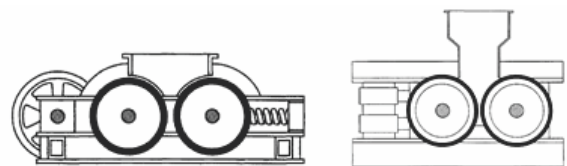
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết (tính toán) và thiết kế dựa trên các phần mềm hỗ trợ nhờ máy tính.

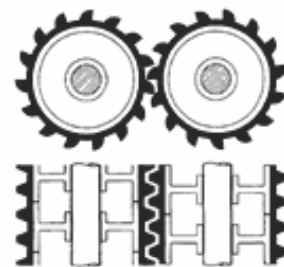
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

3.1. Kết quả nghiên cứu lựa chọn nguyên lý kết cấu

Hiệu suất của máy nghiền trục lăn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi điều kiện cấp liệu, yếu tố quyết định tỷ lệ nghiền và tỷ lệ $(D/d_{\max})$. Trục lăn trơn là loại ít phù hợp nhất. Việc trang bị cho trục lăn các thiết bị hỗ trợ cấp liệu như cam, răng hoặc gai sẽ cải thiện đáng kể tình hình. Do đó, cần phân biệt giữa hai nhóm: (i) Máy nghiền trục trơn (Hình 1) là máy nghiền trục không có trợ giúp cấp liệu: Các trục trơn hoặc có rãnh. Do điều kiện cấp liệu, máy nghiền trục trơn chỉ có thể được sử dụng làm máy nghiền mịn; (ii) Máy nghiền trục lăn có các bộ phận hỗ trợ cấp liệu với nhiều hình dạng khác nhau, chẳng hạn như cam, răng hoặc gai; Hình 2 cho thấy các trục lăn của máy nghiền trục lăn có cam. Các cam ăn khớp với nhau. Các trục lăn bao gồm các đĩa thép tôi cứng được kẹp bằng bu lông neo. Tỷ lệ $(D/d_{\max})$ có thể giảm xuống khoảng 10, và thậm chí xuống 5 đối với vật liệu có mật độ thấp hơn. Máy nghiền trục lăn có cam thích hợp làm máy nghiền thô. Tài liệu [3-5] cho thấy rằng các trục lăn có đường kính 2500 mm có thể xử lý các mảnh có kích thước lên đến 1000 mm. Chúng được cắt nhỏ trước và sau đó, sau khi giảm kích thước thích hợp, được đưa vào các trục lăn.



Hình 1. Máy nghiền trục lăn trơn [3]



Hình 2. Máy nghiền trục lăn có các bộ phận hỗ trợ cấp liệu [3]

Theo [3-5] cho thấy, các phạm vi kích thước và thông số vận hành điển hình cho máy nghiền trục trơn và trục lăn có các bộ phận hỗ trợ cấp liệu như trên Bảng 1.

Bảng 1. Kích thước và thông số vận hành của máy nghiền trục lăn [3-5].

Lĩnh vực ứng dụng	Máy nghiền trục lăn trơn	Máy nghiền trục cam	
Thông số	Nghiền mịn các vật liệu cứng/trung bình	Nghiền thô vật liệu có độ cứng trung bình/mềm	Thứ nguyên
Đường kính con lăn	300 đến 1800	500 đến 2500	mm
Chiều dài/Đường kính	0,3 đến 1,0	0,3 đến 1,0	
Tốc độ con lăn	4 đến 20	2 đến 12	m/s
Tỷ lệ $(D/d_{\max})$	15 đến 25	5 đến 12	
Tỷ lệ nghiền/tỷ lệ làm nhỏ	Nhỏ hơn 4 đến 6	Nhỏ hơn 5 đến 12	

3.2. Kết quả tính toán

Vật liệu được nghiền chịu áp suất cao từ 50 đến 200 MPa, vốn cực đáng kể và thoát ra khỏi khe hở của con lăn dưới dạng mảnh vụn với tỷ lệ thể tích chất rắn từ 75 đến 85%. Do áp suất cao, một tỷ lệ lớn sản phẩm hoàn thiện được tạo ra chỉ trong một lần nghiền, dẫn đến tỷ lệ tái chế thấp hơn đáng kể. Kích thước của máy nghiền trục lăn kiểu cố định được xác định bởi đường kính và chiều dài của trục lăn. Đường kính trục lăn nằm trong khoảng từ 0,5 đến 2 m, tỷ lệ chiều dài trên đường kính từ 0,3 đến 1, và tốc độ chu vi trục lăn thường từ 0,5 đến 2,0 m/s. Áp suất cao đòi hỏi lực nghiền cụ thể từ 2 đến 10 N/mm² [3-4, 6-8].

Để đảm bảo quá trình nghiền trong máy nghiền trục lăn, các mảnh vật liệu tái chế đã nghiền phải được kéo vào khoảng trống giữa các trục lăn. Điều kiện này được đáp ứng nếu tổng các lực hướng xuống lớn hơn tổng các lực hướng lên (Hình 3), tức là nếu bất đẳng thức > 0 [3, 7].

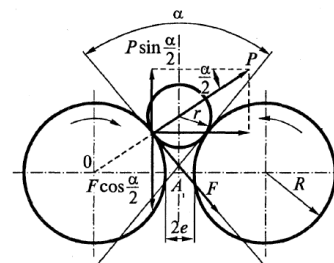
$$2P \sin \frac{\alpha}{2} \leq 2F \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

Trong đó P là lực tác dụng lên vật bị nghiền, hướng vuông góc với chu vi con lăn; F = fP là lực ma sát của vật liệu tái chế với con lăn, hướng tiếp tuyến với chu vi con lăn; α là góc kẹp [3, 7].

Sau khi thực hiện các phép biến đổi, ta thu được:

$$\tan \frac{\alpha}{2} \leq f, \quad (2)$$

Trong đó f là hệ số ma sát giữa bề mặt vật liệu tái chế và con lăn.



Hình 3. Sơ đồ tính toán góc thu gom của máy nghiền trục lăn [3, 7]

Từ Hình 3, ta có [3, 7]:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{R+e}{R+r} = \frac{D+2e}{D+2r}, \quad (3)$$

Ở đây:

$$\frac{D}{d} = \frac{\cos \frac{\alpha}{2} - \frac{2e}{d}}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (4)$$

Trong đó: D là đường kính con lăn; d là đường kính vật liệu tái chế; 2e là khoảng cách giữa các con lăn. Lấy $f = 0,3$ và $\alpha < 18^\circ$, và xét rằng mức độ nghiền trong máy nghiền con lăn có con lăn trơn là $I \approx 4$, tức là $2e/d = 1/4$, ta thu được đối với con lăn trơn [3, 7].

$$\frac{D}{d} \approx 18. \quad (5)$$

Trên thực tế, $D = (18...25)d$ được chấp nhận cho các con lăn trơn; $D = (10...12)d$ cho các cuộn lượn sóng [3-4, 7-8].

Tính toán các lực tác dụng trong máy nghiền trục lăn. Lực cần thiết để nghiền vật liệu giữa các trục lăn được tạo ra bởi lực căng của các lò xo đỡ trục lăn di động và được xác định bằng một công thức thực nghiệm [3, 7].

$$P = pF, \quad (6)$$

Trong đó, p là áp suất riêng của vật liệu nghiền trên con lăn trong vùng tiếp xúc, N/m^2 ; F là diện tích tiếp xúc của con lăn với vật liệu tái chế nghiền, m^2 , bằng [3, 7]:

$$F = \alpha RL, \quad (7)$$

Trong đó, α là góc “bắt vật liệu”, tính bằng radian; R, L lần lượt là bán kính và chiều dài của “luồng” vật liệu, tính bằng mét.

Thay công thức (7) vào (6), ta thu được:

$$P = p\alpha RLk,$$

Trong đó, k là hệ số tính đến sự không ổn định của nguyên liệu/vật liệu tái chế cấp vào máy nghiền và các đặc tính của vật liệu (đối với vật liệu tái chế khô, sử dụng giá trị 0,2...0,3; và đối với vật liệu tái chế ướt, sử dụng giá trị 0,4...0,6) [3-4, 7-8].

Áp suất riêng được lấy như sau: Đối với các trục lăn nhỏ ($D < 500$ mm), $p = 9 \cdot 10^6$ N/m^2 ; đối với các trục lăn trung bình ($D = 500...900$ mm), $p = (12...14)10^6$ N/m^2 ; đối với các trục lăn lớn ($D > 900$ mm), $p = 25 \cdot 10^6$ N/m^2 [3-4, 7-8].

Việc tính toán độ bền của các bộ phận máy nghiền trục lăn được thực hiện bằng cách sử dụng lực P đã được định nghĩa ở trên.

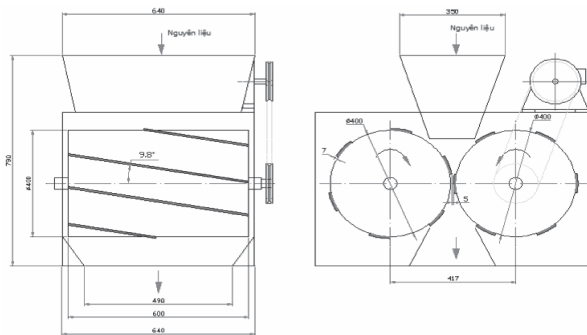
Sự phụ thuộc của công suất truyền động vào đường kính con lăn, yếu tố cũng quyết định kích thước máy nghiền, phụ thuộc vào việc lực nghiền riêng F_{sp} và tốc độ u_w có được giữ không đổi hay không. Trong trường hợp thứ nhất, $P \sim LD \sim (L/D) D^2$. Tuy nhiên, nếu gia tốc ly tâm được giữ không đổi, như thường thấy ở các máy nghiền trục lăn, thì $P \sim LD^{1,5} \sim (L/D) Z^{2,5}$ [6].

Bảng 2. Kết quả tính toán thiết kế

TT	Thông số chính	Giá trị tính toán	Giá trị lựa chọn thiết kế	Thứ nguyên
1	Đường kính lô ép/trục ép (D)	403,5	400	mm
2	Chiều dài lô ép/trục ép (L)	605	600	mm
3	Số vòng quay lô ép/trục ép (n)	1425	1400	v/ph
4	Công suất (N)	4,65	5,5	kW
5	Năng suất (Q)	0,55	0,5	t/h
6	Góc nghiêng gân lô ép (α)	10,02	9,8-10	độ

3.3. Kết quả thiết kế

Cơ sở khoa học để thiết kế các máy móc trong hệ thống dựa trên các kết quả tính toán nêu trên. Từ đó làm cơ sở để xây dựng/thiết kế bản vẽ chung, kết quả thiết kế được thể hiện thông qua bản vẽ tổng thể như trên Hình 4.



Hình 4. Kết quả xây dựng bản vẽ tổng thể thiết kế máy nghiền lô ép

Kết quả tính toán thiết kế làm cơ sở để xây dựng bản vẽ thiết kế phục vụ cho công tác chế tạo như trên Hình 4. Sau đó “mẫu máy” được chế tạo phục vụ cho công tác thử nghiệm được diễn tả như trên Hình 5. Trên Hình 4 và Hình 5 cho thấy để tăng hiệu suất làm việc, thông qua việc tăng ma sát bám dính giữa tấm vật liệu cần nghiền tái chế với bề mặt lô nghiền, ở đây có sự sáng tạo thiết kế thêm các gân, ở đây được thử nghiệm gân có tiết diện mặt cắt ngang dạng hình vuông và được bố trí theo đường cycloid (đường xycloit) nhằm vừa tăng độ ma sát và tải trọng làm việc thay đổi “êm dịu” không bị ảnh hưởng bởi “xung lực”, vì thế máy làm việc sẽ không có hiện tượng “giật cục”, tiếng ồn nhỏ, máy “ổn định” hơn,... góc nghiêng được bố trí nằm trong khoảng 9-10° so với đường sinh của lô nghiền.

3.4. Kết quả chế tạo và lắp đặt

Trên Hình 5 trình bày/thể hiện kết quả chế tạo và lắp đặt phục vụ cho thực nghiệm.



Hình 5. Hình ảnh kết quả chế tạo máy nghiền dạng lô ép

4. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã đưa ra được kết quả nghiên cứu tính toán, thiết kế, chế tạo thử nghiệm máy nghiền trục/nguyên lô, máy này thuộc hệ thống dây chuyền xử lý/tái chế chất thải rắn từ tấm pin mặt trời. Kết quả tính toán xác định được với các thông số kỹ thuật chính như: đường kính lô ép D (400mm); chiều dài lô ép/bề rộng làm việc L (600mm); số vòng quay n (1400); công suất N (5,5kW). Năng suất của máy nghiền trục ($Q = D.L.v.p.f$) (t/h) phụ thuộc vào một số yếu tố chính như: đường kính, chiều dài trục/bề rộng làm việc, tốc độ trục, áp suất và độ ẩm của vật liệu,... Tuy nhiên, trong khuôn khổ bài báo/nghiên cứu này, tác giả bước đầu chỉ tập trung nghiên cứu xác định các thông số kỹ thuật chính như nêu trên, còn lại các thông số, yếu tố khác ảnh hưởng tới năng suất của thiết bị được xác định nhờ mô hình thực nghiệm, được trình bày trong nghiên cứu tiếp theo khi xác định tối ưu hóa hiệu suất.

Đã đưa ra trên thị trường Việt Nam “mẫu” máy/thiết bị có nhiều điểm nổi trội phù hợp trong dây chuyền hệ thống thiết bị xử lý/tái chế chất thải rắn từ tấm pin mặt trời phù hợp với điều kiện Việt Nam về đầu tư và phù hợp với các doanh nghiệp xử lý chất thải rắn, góp phần trong tương lai giảm thiểu chất thải và ô nhiễm môi trường và tăng hiệu quả kinh tế trong xử lý môi trường cho doanh nghiệp do tận thu được nguồn chất thải.

Làm chủ được công nghệ chế tạo đối với ngành cơ khí chế tạo trong nước, giảm “chảy máu ngoại tệ” ra thị trường nước ngoài.

Tiếp tục nghiên cứu tính toán, thiết kế đối với hệ thống thiết bị xử lý xét đến phương án ứng dụng điều khiển tự động (IoT) theo xu thế ứng dụng công nghiệp 4.0; Ứng dụng điều khiển điện thoại từ xa và lưu trữ dữ liệu. ❖

Ngày nhận bài: **18/6/2026**

Ngày phản biện: **03/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Walter Müller, “*Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten*”. 3. Auflage, 2022, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston.
- [2]. Xiaobo Chen, Yulin Zhong, Lei Zhang,..., “*Energy Technology 2020: Recycling, Carbon Dioxide Management, and Other Technologies*”. Springer, 2020.
- [3]. Heinrich Schubert, “*Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*”. WILEY-VCH Verlag, 2003.
- [4]. Lubjuhn, U., u. K. Schönert, “*Kompressionswinkel und Durchsatz der Gutbett-Walzenmühle*”. Zement-Kalk-Gips 45 (1992), S. 621-627.
- [5]. Lim, W.I.L., u. K.R. Weller, “*Modelling of throughput in the high pressure grinding rolls*”. Proceedings XX International Mineral Processing Congress, Vol. 2, S. 173-184, GDMB, Clausthal-Zellerfeld, 1997.
- [6]. Johanson, J.R., “*A rolling theory for granular solids*”. Trans. ASME12 (1965), S. 842-848.
- [7]. Поникаров И.и., Гайнуллин М.г., “*Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки*”. Учебник, 2020.
- [8]. Lubjuhn, U., Sander, U., u. K. Schönert, “*Druckprofil in der Kompressionszone der Gutbett-Walzenmühle*”. Zement-Kalk-Gips 47 (1994), S. 192-199.