

Математическое описание и физика движения сыпучих масс в барабанах непрерывного действия

Б.М. Локштанов^{1a}, В.В. Орлов^{1b}, Т.А. Гусева^{1c}, Е.В. Михеева^{1d},
Д.А. Ильющенко^{2e}, В.А. Иванов^{3f}, Ю.М. Елизаров^{3g}

¹ Военная академия связи им. С.М. Буденного, пр. Тихорецкий, 3, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

³ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a blokshtanov@mail.ru, ^b artictvetal1987@gmail.com, ^c guse.tania2012@yandex.ru, ^d mikheevaelena338@gmail.com,

^e dilium@yandex.ru, ^f ivanovva55@mail.ru, ^g transportgruz@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-5390-1457>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1059-8483>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3548-0131>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-0565-1641>

Статья поступила 12.11.2021, принята 19.11.2021

Авторы статьи рассматривают процесс движения сыпучего материала во вращающемся горизонтальном барабане непрерывного действия. На основе предположения, что материал заполняет барабан в виде сегмента в поперечном сечении и происходит обрушение материала по поверхностным слоям сегмента по прямым линиям, разработана математическая модель процесса движения материала. В процессе движения происходят силовые взаимодействия сегмента с внутренней поверхностью барабана и со слоями сегмента, т. е. рассмотрены физические процессы, происходящие в сыпучем материале. Предложенная математическая модель рассматривает движение не отдельного элемента сыпучего материала, а их совокупности в виде клина обрушения и его перемещение как в поперечном, так и в продольном направлении движения барабана. На основе рассмотренной математической модели получены формулы для расчета времени прохождения материал от загрузочного к выгрузочному отверстию барабана и производительности барабана.

Ключевые слова: вращающийся горизонтальный барабан; сегмент заполнения; клин обрушения; сыпучий материал.

Mathematical description and physics of movement of bulk masses in continuous drums

B.M. Lokshtanov^{1a}, V.V. Orlov^{1b}, T.A. Guseva^{1c}, E.V. Mikheeva^{1d},
D.A. Ilyushenko^{2e}, V.A. Ivanov^{3f}, Yu.M. Elizarov^{3g}

¹ Military Academy of Communication named after S.M. Budenny; 3, Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

³ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a blokshtanov@mail.ru, ^b artictvetal1987@gmail.com, ^c guse.tania2012@yandex.ru, ^d mikheevaelena338@gmail.com,

^e dilium@yandex.ru, ^f ivanovva55@mail.ru, ^g transportgruz@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-5390-1457>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1059-8483>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3548-0131>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-7758-5110>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-0565-1641>

Received 12.11.2021, accepted 19.11.2021

The article consider the process of movement of bulk material in a rotating horizontal continuous drum. Based on the assumption that the material fills the drum in the form of a segment in a cross-section and that the material collapses along the surface layers of the segment along straight lines, a mathematical model of the material movement process has been developed. In the process of movement, force interactions of the segment with the inner surface of the drum and with the layers of the segment occur, i.e. physical processes occurring in bulk material are considered. The proposed mathematical model considers the movement of not an individual element of bulk material, but their combination in the form of a collapse wedge and its movement, both in the transverse and longitudinal directions of the drum. On the basis of the considered mathematical model, formulas are obtained for calculating the time of passage of the material from the loading to the unloading hole of the drum and the productivity of the drum.

Keywords: rotating horizontal drum; filling segment; caving wedge; bulk material.

Введение. Барабаны применяются в различных отраслях промышленности для смешивания различных сыпучих веществ, для сортирования (разделения) сыпучих веществ по фракциям (рис. 1, а) [1], для сушки влажных

материалов, например опилок, для температурной обработки клинкера в цементной промышленности (рис. 1, б)

[2], для окорки древесины в целлюлозно-бумажной промышленности и т. д.



а)



б)

Рис. 1. Промышленные барабаны: а — передвижная барабанная сортировочная установка на песчаном карьере; б — вращающаяся барабанная печь для производства цемента

Для создания новых высокопроизводительных барабанов для обработки сыпучих материалов необходимо знать свойства сыпучих сред. Впервые в СССР научно обоснованное описание свойств сыпучих материалов выполнено Р.Л. Зенковым [3]. Им заложены основы теории движения сыпучих масс в бункерах, барабанах и др. установках. Проблемой движения сыпучих материала в барабанах занимались З.В. Канторович и его последователь Е.И. Ходоров [4–6], но ими

рассматривались наклонные барабаны в цементной промышленности (печи) длиной около 100 м при незначительном заполнении таких барабанов сыпучим материалом в пределах 10–15 % от площади поперечного сечения барабана. Особую сложность представляют расчеты барабанов для целлюлозно-бумажной промышленности, так как в качестве сыпучей среды рассматривается древесина (бревна диаметром 6–40 см, длиной 0,7–5 м) [7; 12; 13]. Ученые предлагали различ-

ные математические модели движения сыпучих материалов в барабанах с целью решения вопроса движения сыпучих сред [5; 6; 14]. В данной работе рассматривается упрощенная математическая модель движения сыпучих материалов в барабане, основанная на том, что движение сыпучего материала происходит в верхних слоях сегмента заполнения (по хордам — по прямым линиям, в виде клина обрушения).

Цель работы. Разработка упрощенной математической модели движения сыпучих материалов в барабанах непрерывного действия, позволяющей рассчитывать параметры барабанов, время прохождения материала через барабан, скорость его вращения и производительность.

Решение задачи. Разработка математической модели движения сыпучих материалов вдоль оси горизонтально расположенных барабанов непрерывного действия.

Рассмотрим движение сыпучего материала вдоль оси горизонтально расположенного вращающегося барабана.

Обычно барабан заполняют сыпучими веществами на 0,1–0,8 его объема (в поперечном сечении — сегмент заполнения). При вращении барабана сегмент заполнения поворачивается на определенный угол β (угол динамического откоса), зависящий от свойств сыпучего материала — размеров частиц и их формы (круглая, продолговатая, пластичная и т. п.), влажности, плотности, скорости вращения барабана и т. д. После этого происходит обрушение поверхностных слоев сегмента (условно по хорде) [7], а угол наклона сыпучего материала принимает значения угла естественного откоса сыпучего материала δ (статический наклон материала как сыпучей среды).

Благодаря трению и сцеплению сыпучей среды со стенками барабана весь сегмент поворачивается как единое целое. Затем слои сыпучей среды, находящиеся в зоне хорды, обрушаются (зона обрушения). При этом предполагается отсутствие скольжения массы сыпучей среды по внутренней поверхности барабана и, при скоростях вращения барабана с малыми величинами, центробежных сил [9; 10]. В связи с этим, пренебрегая центробежной силой, считаем, что на сыпучую среду действует только сила тяжести материала P . Эту силу раскладываем на силу, действующую по поверхностному слою (слоям), и перпендикулярную ей N , которая вызывает пропорциональную ей силу трения $F_{тр}$ (рис. 2).

Коэффициент трения частиц сыпучего материала друг с другом f , который проявляется в поверхностных слоях сегмента при обрушении и может быть определен из условия (рис. 2, б), когда $S \geq F_{тр}$ или:

$$S = P \sin \delta \geq F_{тр} = fP \cos \delta \text{ или } f \leq \operatorname{tg} \delta. \quad (1)$$

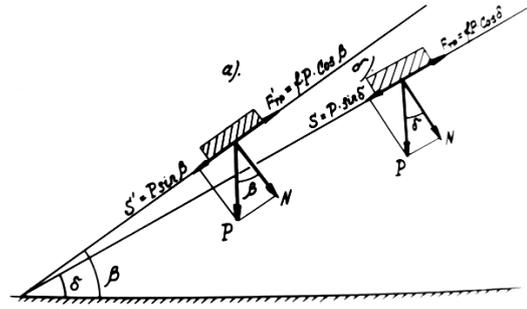


Рис. 2. Силы, действующие на сыпучий элемент, находящийся на поверхности сегмента заполнения: а — сегмент в динамическом состоянии; б — сегмент в статическом состоянии

Вся масса сыпучего материала, находящаяся в поверхностных слоях сегмента, приходит в движение, когда угол наклона сегмента достигнет величины β — происходит обрушение (рис. 2, а), тогда можно записать условие обрушения $S' - F'_{тр}$ или:

$$P \cdot \sin \beta - fP \cos \beta = mg(\sin \beta - \operatorname{tg} \delta \cdot \cos \beta). \quad (2)$$

Сыпучая масса при обрушении совершает сложное движение относительно оси барабана и относительно остальных слоев сегмента. В зоне обрушения происходят основные процессы, обеспечивающие интенсивное перемешивание сыпучей массы и ее перемещение вдоль оси барабана.

Перемещение сыпучей массы вдоль оси барабана по поверхностным слоям сегмента происходит за счет наклона плоскости обрушения вдоль оси барабана из-за разницы степени заполнения барабана сыпучим материалом на входе и выходе. Угол наклона этой плоскости к оси барабана γ зависит от свойств сыпучей среды, длины барабана, интенсивности загрузки и выгрузки материала. Режим движения материала вдоль оси барабана следует считать установившимся, когда количество входящего в барабан материала равно количеству выходящего из него материала. Если барабан выполняет функцию сортировочной установки, то режим установившегося движения материала следует считать с учетом удаляемой из барабана части материала.

Представим барабан радиусом R (рис. 3, а), сегмент заполнения сыпучим материалом которого A_1 и A_2 . Сегмент характеризуется центральным углом 2α . Обрушение поверхностных слоев материала происходит при угле наклона сегмента β . Эпюра веса сыпучего материала, действующего на стенку барабана, показана на рис. 3, б (кривые A_2E , A_2D).

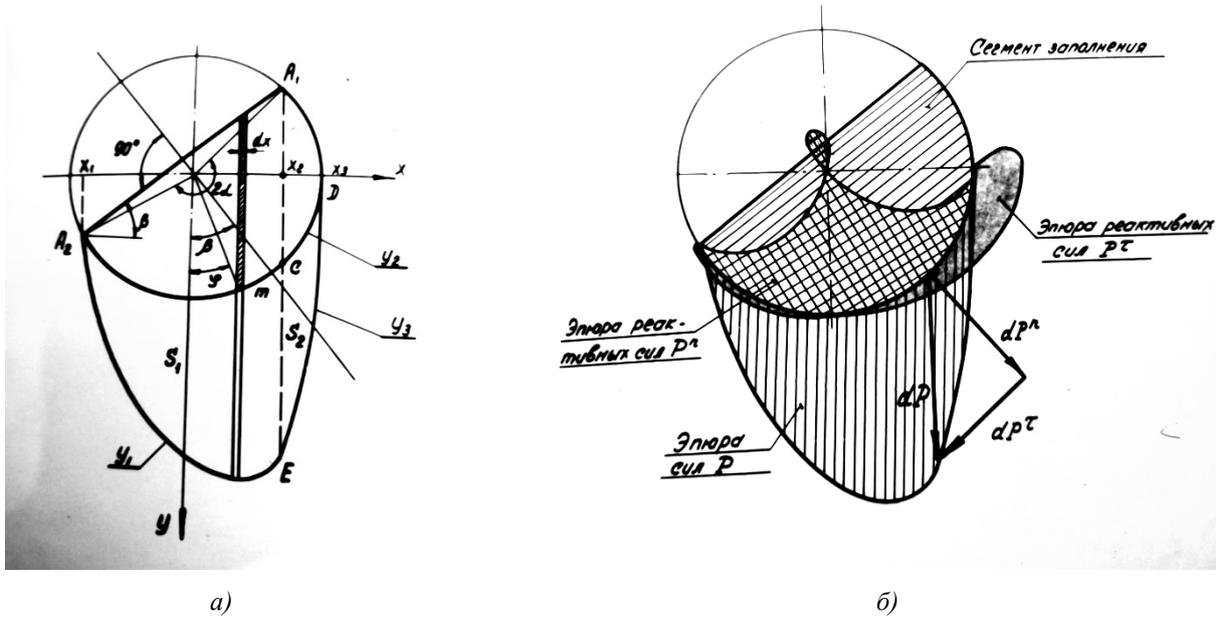


Рис. 3. Эпюры сил, действующих на барабан от сегмента заполнения его сыпучим материалом: а — эпюра веса сыпучего материала, находящегося в барабане; б — эпюры распределения реактивных сил от веса сегмента заполнения сыпучим материалом

Эти кривые можно описать уравнениями:

$$y_1 = 2\sqrt{R^2 - x^2} - x \operatorname{tg} \beta + R \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}; y_2 = \sqrt{R^2 - x^2}; y_3 = 3\sqrt{R^2 - x^2}. \quad (3)$$

Для удобства расчетов разделим площадь эпюры A_2ED на две, S_1 и S_2 , и выделим в пределах этих площадей элементарные слои dX_1 и dX_2 , причем $x_1 \leq X_1 \leq x_2$; $x_2 \leq X_2 \leq x_3$, тогда:

$$dS_1 = dx_1 \int_{y_2}^{y_1} dy; dS_2 = dx_2 \int_{y_2}^{y_3} dy \quad (4)$$

Соответствующие давления на барабан от сил веса сыпучего материала с учетом его плотности γ_M определится как:

$$dP_1 = \gamma_M dS_1; dP_2 = \gamma_M dS_2. \quad (5)$$

Разложим эти давления на нормальные P^n и касательные P^τ по отношению к поверхности барабана (рис. 3, б):

$$P_1^n = \frac{\gamma_M R^2 L}{3 \cos \beta} [2 \sin \alpha (3 \cos^2 \beta \cdot \cos 2\beta - \sin^2 \alpha \cdot \cos 4\beta) + 3 \cos \alpha (0,5 \cdot \sin 2\alpha \cdot \cos 2\beta + \alpha)]$$

$$P_1^\tau = \frac{3}{2} \gamma_M R^2 L \sin \alpha \cdot \sin \beta (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \beta + 8 \cos^2 \alpha \cdot \cos \beta) \quad (8)$$

$$P_2^n = \frac{3}{2} \gamma_M R^2 \cdot L [2 - 3 \sin(\alpha + \beta) + \sin^3(\alpha + \beta)]$$

$$P_2^\tau = \frac{3}{2} \gamma_M \cdot R^2 L \cos(\alpha + \beta).$$

$$dP_1^n = dP_1 \cdot c \cos \varphi$$

$$dP_2^n = dP_2 \cdot \cos \varphi$$

$$dP_1^\tau = dP_1 \cdot \sin \varphi \quad dP_2^\tau = dP_2 \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

Отметим, что $\sin \varphi = \frac{x}{R}$; $\cos \varphi = \frac{\sqrt{R^2 + x^2}}{R}$; φ — переменный угол.

Интегрируя формулу (6) в соответствующих пределах, получим:

$$P_1^n = \int_{x_1}^{x_2} dP_1^n; P_2^n = \int_{x_2}^{x_3} dP_2^n;$$

$$P_1^\tau = \int_{x_1}^{x_2} dP_1^\tau; P_2^\tau = \int_{x_2}^{x_3} dP_2^\tau; \quad (7)$$

Подставляя в формулу (7) значения из предыдущих уравнений и учитывая, что $x_1 = -R \sin(\alpha - \beta)$; $x_2 = R \sin(\alpha + \beta)$, а $x_3 = R$, найдем интегрированные выражения для соответствующих сил давления. После их интегрирования получим:

Распределение сил P, P_p^n, P_p^r показано на рис. 3, б).

Определим силы сцепления F_1^{cu} и F_2^{cu} для соответствующих частей сегмента заполнения:

$$\begin{aligned} F_1^{cu} &= f_{cu} P_1^n \\ F_2^{cu} &= f_{cu} P_2^n, \end{aligned} \quad (9)$$

где f_{cu} — коэффициент сцепления между сегментом заполнения и внутренней поверхностью барабана.

$$\begin{cases} f_{cu} \geq \frac{2 \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta (\sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \beta + 8 \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta)}{2 \sin \alpha (3 \cos^2 \beta \cdot \cos^2 \beta - \sin^2 \alpha \cdot \cos 4\beta + 3 \cos \alpha (0,5 \sin 2\alpha \cdot \cos 2\beta + \alpha))} \\ f_{cu} \geq \frac{\cos^3 (\alpha + \beta)}{2 - 3 \sin (\alpha + \beta) + \sin^3 (\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (11)$$

Анализ неравенств (11) показал, что f_{cu} , в зависимости от степени заполнения барабана сыпучим материалом 2α , может принимать различные значения, соответствующие нескольким видам (состояниям) движения сегмента заполнения (рис. 4).

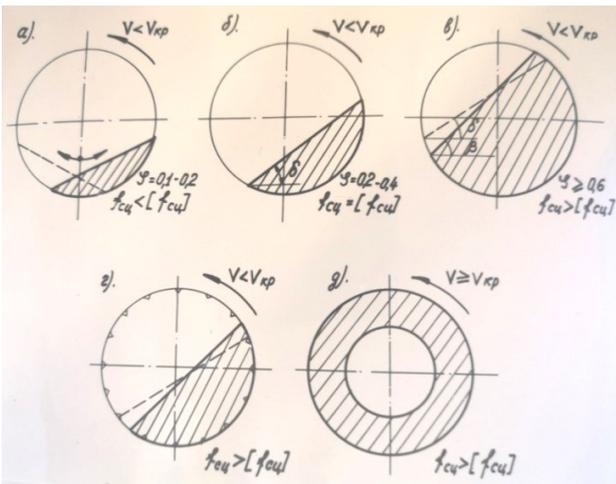


Рис. 4. Характер движения сегмента заполнения сыпучим материалом при вращении барабана

1. Сегмент совершает колебательные движения при вращении барабана, когда $2\alpha \leq 90^\circ$ (степень заполнения $0,1-0,2 D$) и $f_{cu} < [f_{cu}]$ (рис. 4, а), и обрушения поверхностных слоев материала не происходит.

2. Сегмент находится в состоянии равновесия, но его центр тяжести отклонен на угол, меньший β (сегмент скользит по поверхности барабана, и обрушения материала не происходит) (рис. 4, б). Это состояние соответствует $2\alpha = 90-180^\circ$ при степени заполнения $0,2-0,4 D$, а $f_{cu} = [f_{cu}]$.

3. Сегмент наклонен к горизонту на угол β , и сыпучий материал постоянно обрушается по плоскости (слоям) обрушения. При этом степень заполнения самого барабана сыпучими материалами составляет $0,6-0,8 D$, а $f_{cu} > [f_{cu}]$ (рис. 4, в).

Для соблюдения условий, при которых происходит обрушение сыпучей массы, необходимо исключить проскальзывание материала по внутренней поверхности барабана, т. е.:

$$\begin{cases} P_1^r \leq F_1^{cu} \\ P_2^r \leq F_2^{cu} \end{cases} \quad (10)$$

Подставив величины из формул (8) и (9) в формулу (10), получим:

4. При искусственном создании условий $f_{cu} > [f_{cu}]$ путем установления на внутренней поверхности барабана различных продольных балок (рис. 4, з) применения мягких материалов (резина, поролон и т. п.) или создания шероховатости поверхности барабана происходит подъем сегмента на угол β , поверхностные слои сегмента обрушаются. Отметим, что у сортировочных барабанов отверстия создают эту шероховатость. Степень заполнения барабана может составить $0,1-0,8 D$, а $f_{cu} > [f_{cu}]$ (рис. 4, з).

5. Первые четыре состояния сегмента рассмотрены при скоростях вращения барабана ниже «критической» $V < V_{кр}$. В случае, если $V \geq V_{кр}$, сегмент разрушается под действием центробежных сил, и сыпучий материал «растекается» по стенке барабана, нет движения материала, нет обрушения, это уже другой процесс — центрифугирование (рис. 4, д).

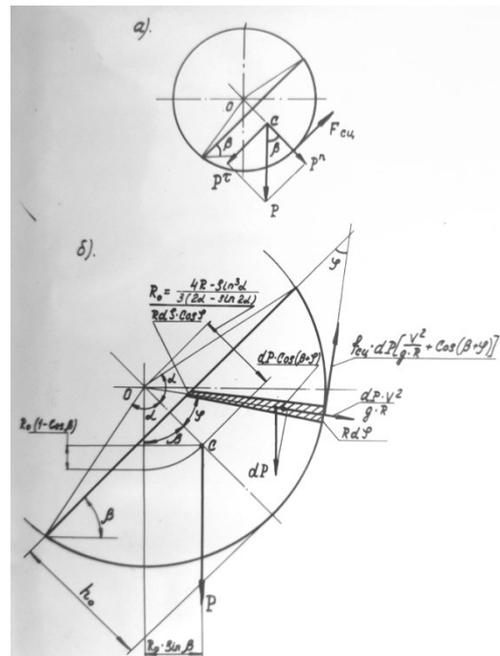


Рис. 5. Схема сил, действующих на сегмент заполнения: а — силы, действующие на сегмент; б — силы, действующие на элемент сегмента

На сегмент заполнения барабана сыпучим материалом в основном действует сила тяжести P (рис. 5). Разлагая эту силу на силу P^r , параллельную поверхности слоя обрушения, и перпендикулярную ей P^n , получим соответствующие моменты сил, определяющие состояние сегмента.

Сила P^r на плече от центра барабана (оси барабана) до центра тяжести сегмента создает момент M_p , заставляющий сегмент занять горизонтальное, максимально низкое положение. Сила P^n вызывает силу трения, которая на плече, равном внутреннему радиусу

$$dF_{cu} = 0,5 f_{cu} \gamma_M \cdot R^2 \left[\frac{\cos 2\varphi - \cos 2\alpha}{\cos^2 \varphi} \cdot \cos(\varphi + \beta) + \frac{V^2 \cos \varphi (\cos^2 \varphi - \cos^2 \alpha)}{g \cdot R (\cos^3 \varphi - \cos^3 \alpha)} \right] d\varphi \quad (14)$$

$$0,5 f_{cu} (2 \sin \alpha - \cos^2 \alpha \cdot \ln \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha}) \cos \beta + \frac{R f_{cu}}{3g} \omega^2 \left[2\delta - \left(\sin \alpha \cdot \cos \alpha + 0,5 \cos^2 \alpha \cdot \ln \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \right) \right] = \frac{2}{3} \sin^3 \alpha \sin \beta \quad (15)$$

где ω — угловая скорость вращения барабана.

Уравнение (15) можно написать в другом, упрощенном виде:

$$f_{cu} \cdot X \cdot \cos \beta + \frac{R \cdot f_{cu} \cdot \omega^2}{3g} \cdot Y = Z \sin \beta. \quad (16)$$

При остановке барабана, когда $\omega = 0$, уравнение (16) примет вид:

$$f_{cu} \cdot x \cos \beta = z \cdot \sin \beta \text{ или } \operatorname{tg} \beta = \frac{x}{z} f_{cu} \quad (17)$$

Таким образом, для обеспечения движения сыпучего материала, расположенного в сегменте заполнения, необходимо, чтобы момент сил трения M_f , возникающий на внутренней поверхности барабана, был равен моменту сил тяжести M_p , действующих на сегмент.

При обрушении сыпучего материала по поверхностным слоям сегмента в движение вовлекается определенная совокупность материала. Рассмотрим это явление. Во время вращения барабана плоскость обрушения займет положение, характеризуемое прямой АВ (рис. 6) под углом β к горизонту.

Далее барабан поворачивается на угол $d\beta$ (прямая A_1B_1). Клин с сечением A_1B_1C обрушивается по плоскости откоса A_1C . Затем следует поворот на $d\beta$ и т. д., — непрерывно происходят подъем и обрушение материала и его перемещение вдоль оси барабана за счет подачи материала и его выхода из барабана. Угол наклона плоскости обрушения к оси барабана γ .

Площадь клина $A_1B_1C_1$ равна:

$$dF' = \frac{1}{2} AB \cdot CD \approx 2R^2 \sin^2 \alpha_k d\beta.$$

Обрушение происходит за время dt , в течение которого происходит поворот на $d\beta$, тогда:

барабана, создает момент M_f , поднимающий сегмент и поворачивающий его относительно горизонта:

$$M_p = \frac{2}{3} \gamma_M \cdot R^3 \sin^3 \alpha \cdot \sin \beta, \quad (12)$$

$$dM_f = dF_{cu} R. \quad (13)$$

Сила трения между стенкой барабана и материалом сегмента можно определить по формуле (14).

После интегрирования формулы (14) от $-\alpha$ до $+\alpha$ с соблюдением равенства моментов получим формулу (15).

$$F' = 2R^2 \omega \sin \alpha_k.$$

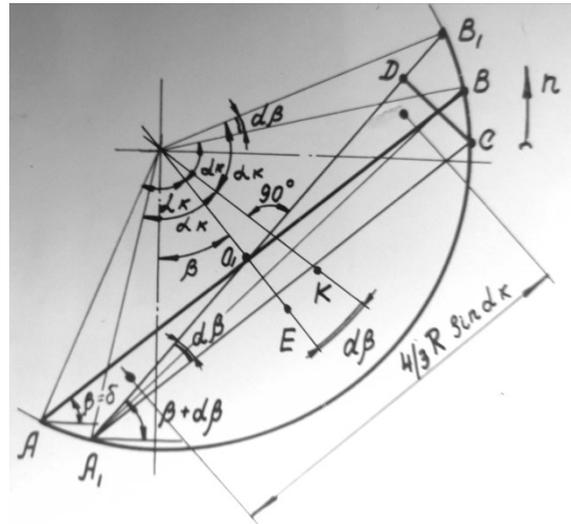


Рис. 6. Схема клина обрушения сыпучего материала в поперечном сечении барабана

Рассмотрим, какие перемещения произойдут при обрушении. После поворота на угол $d\beta$ клин BB_1O обрушится и примет положение A_1AB . Полностью изменит свое местоположение только клин O_1BB_1 который займет положение O_1AA_1 . Средняя часть клина A_1BO_1 не изменится. Площадь $BB_1O_1 = AA_1O_1$ и равна $dF'' = \frac{1}{2} R^2 \cdot \sin \alpha_k d\beta$, тогда площадь F'' клина BB_1O_1 будет:

$$F'' = \frac{1}{2} R^2 \sin \alpha_k \omega. \quad (18)$$

Среднее расстояние l_k , которое пройдет сыпучая масса после обрушения, определяется расстоянием между центрами тяжести клина B, B_1O_1 и A, A_1O_1 :

$$l_k = \frac{4}{3} R \sin \alpha_k \quad (19)$$

Благодаря наклону плоскости обрушения (угол γ) клин B, B_1O_1 пройдет путь вдоль оси барабана (ось Y) на величину $Y_k = l_k a_2$ (рис. 7) [8], где $a_2 = \frac{\sin \gamma \cdot \cos \beta}{\sin \beta}$,

тогда:

$$Y_k = \frac{4}{3} R \sin \alpha_k \frac{\sin \gamma \cdot \cos \beta}{\sin \beta}. \quad (20)$$

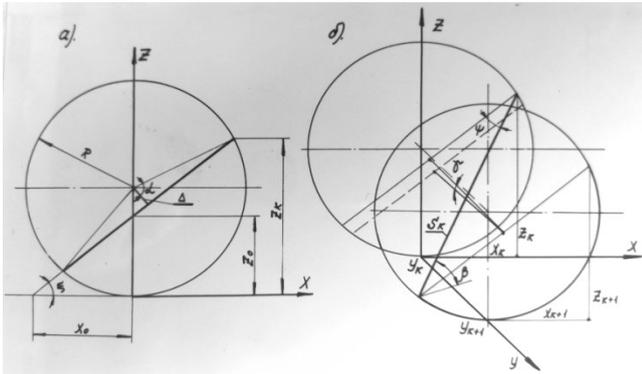


Рис. 7. Траектории движения элемента сыпучей массы в барабане: а — в поперечном сечении барабана; б — в пространстве

Количество обрушений клина B, B_1O_1 за один оборот барабана в среднем сечении барабана можно определить по формуле:

$$\rho = \frac{60}{n \cdot (t'_0 + t_n)} = \frac{60}{n \cdot t'_u},$$

где n — число оборотов барабана, c ; t'_0, t_n — время обрушения и время подъема клина, c ; $t'_0 + t_n = t'_u$ — время цикла (обрушения и подъема) в среднем сечении барабана:

$$t'_u = \sqrt{\frac{2l_{cp}}{g(\sin \beta - f \cos \beta)}} + \frac{\pi 2\alpha_{cp}}{\omega \cdot 180}.$$

Среднее продвижение клина B, B_1O_1 за один оборот барабана вдоль оси барабана:

$$Y^I = \rho \cdot Y_{cp}.$$

Число оборотов барабана n' , требуемое для прохождения клина B, B_1O_1 от загрузочного к выгрузочному отверстию барабана (прохождение материала всей длины барабана L), будет: $n' = L / Y^I$. Тогда продолжительность T прохождения сыпучей массы через барабан будет $T = \frac{n'}{n}$. Подставив в эту формулу T соответствующие величины, получим:

$$T = \frac{L \left[180 \cdot \omega \sqrt{\frac{8R \sin \alpha_{cp}}{3g(\sin \beta - f \cos \beta)}} + \pi 2\alpha_{cp} \right] \sin \beta}{14400 \cdot \omega R \sin \alpha_{cp} \sin \gamma \cos \beta}, \text{ мин} \quad (21)$$

Зная время прохождения сыпучего материала через барабан T (точнее, математическое ожидание времени прохождения сыпучего материала через барабан) [11], можно определить производительность барабана Q по следующим формулам:

$$Q = F_c \cdot U, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где F_c — площадь сегмента заполнения в среднем сечении барабана, м^2 ; U — скорость перемещения сыпучей массы вдоль оси барабана:

$$U = \frac{L}{T}, \text{ м/ч},$$

$$Q = \frac{2400 R^3 \omega \sin \alpha_{cp} \cdot \sin \gamma \cos \beta \left(1 - \frac{\sin 2\alpha_{cp} \cdot 180}{\pi 2\alpha_{cp}} \right)}{\left[\frac{180 \omega}{\pi 2\alpha_{cp}} \sqrt{\frac{8R \cdot \sin \alpha_{cp}}{3g(\sin \beta - f \cos \beta)}} + 1 \right] \sin \beta}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (22)$$

Как видно из формул (18)–(22), на производительность барабана Q влияет большое количество факторов: размеры барабана R и L , степень его заполнения сыпучим материалом F и скорость вращения барабана ω . Если размеры барабана можно увеличивать, например, диаметр барабанов для окорки древесины в ЦБП уже достигает 6 м, а длина барабанов в цементной промышленности — 100 м, то относительно скоростей вращения барабанов есть пределы. Это вызвано значительным влиянием центробежных сил при больших скоростях вращения (превышающих $0,6 \omega_{kp}$), когда движение сыпучей массы нарушается (масса в верхних частях сегмента движется не по плоскости обрушения, а по параболическим траекториям, и движение вдоль оси барабана прекращается). Если скорость вращения барабана равна или превышает критическую ($\omega \geq \omega_{kp}$), то сегмент разрушается, и масса сыпучего материала «прилипает» к стенке барабана, прекращается движение сыпучего материала вдоль его оси.

Изучение процесса движения сыпучих материалов в барабанах позволило разработать систему производства щепы, нарубленной из лесосечных отходов, и произвести ее сортировку и очистку от посторонних примесей с помощью барабана. Выполнены расчеты производительности установки, в том числе и барабана, на данную систему, включающую барабан для очистки щепы. На данную установку получен патент РФ [15].

Выводы. При вращении горизонтального барабана непрерывного действия, частично заполненного сыпучим материалом на $0,1-0,8 D$ (сегмент заполнения), происходят подъем сегмента на угол динамического откоса и обрушение его верхних слоев до угла естественного откоса α . Величина этих углов связана с характеристикой сыпучего материала — размерами его

частиц, их формой, влажностью, коэффициентом трения и т. д.

Обрушение верхних слоев сегмента заполнения происходит циклично (слои обрушаются и потом поднимаются вместе с сегментом). В процессе обрушения сыпучий материал в виде клина обрушения перемещается из верхнего положения сегмента в нижнее положение. Центр тяжести клина обрушения перемещается по плоскости обрушения. Плоскость обрушения наклонена к горизонту на угол β и к оси барабана на угол γ .

Угол γ зависит от свойств сыпучего материала, интенсивности его подачи в барабан и выхода материала из барабана. За счет величины угла γ происходит перемещение клина обрушения не только из верхнего положения в нижнее, но и вдоль оси барабана. Такое движение клина обрушения определяет время нахождения материала в барабане и связанные с этим технологические операции по обработке материала (сортирование, сушка, дробление, смешивание и т. д.). Время переме-

щения материала зависит от длины и радиуса барабана, величины сегмента заполнения (степень заполнения барабана сыпучим материалом), от скорости вращения барабана ω и интенсивности подачи материала в барабан и его выхода из барабана. Скорость вращения барабана имеет предельные значения, при которых материал подчиняется описанному выше процессу. При увеличении скорости вращения барабана выше $0,6 \left[\omega_{кр} \right]$ начинают оказывать большое влияние центробежные силы, нарушающие процессы обрушения, передвижения материала вдоль оси барабана, и вообще, разрушающие конфигурацию сегмента заполнения.

Сегмент заполнения барабана сыпучим материалом должен иметь достаточные силы трения (сцепления или зацепления) со стенкой барабана, обеспечивающие достаточные величины для подъема сегмента на динамический угол β .

Литература

- Интернет-магазин садовой, снегоуборочной, коммунальной, силовой и строительной техники. URL: <http://kinggarden.ru/mobilnye-sortirovshiki-i-proseivateli-othodov/grohot-sortirovochnaya-ustanovka-barabannogo-tipa-komptech-primus-mobilnyy.html> (дата обращения: 05.11.2021).
- ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения». URL: <http://www.eztm.ru/catalog/tsementnoe-oborudovanie/vrashchayushchiesya-pechi/> (дата обращения: 06.11.2021).
- Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. М.: Машиностроение, 1964. 254 с.
- Канторович З.В. Машины химической промышленности. М., Машиностроение, 1965. 415 с.
- Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. Л.: Стройиздат, 1968. 456 с.
- Ходоров Е.И. Проблема исследования движения материала во вращающихся печах. Цемент. 1979. № 1. С. 10-20.
- Локштанов Б.М. Исследование процесса окорки березовой древесины в барабанах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / Марийск. политехн. ин-т им. М. Горького. Йошкар-Ола, 1973. 25 с.
- Локштанов Б.М., Сурков В.И., Жидков А.В. К математическому описанию процесса окорки древесины в барабанах непрерывного действия // Автоматизация, механизация, приборное и аппаратное оформление процессов целлюлозно-бумажного производства: сб. тр. ВНИИБ. Л., 1977. Вып. 71. С. 111-115.
- Селиванов Ю.Т. Движение сыпучего материала в продольном и поперечном сечениях барабанного классификатора // Вестн. ТГТУ. 2016. Т. 22. № 4. С. 615-622.
- Селиванов Ю.Т., Родионов Ю.В., Рыжкин В.Ю., Поздниккин А.О. Исследование влияния осевого движения на процесс классификации сыпучих материалов во вращающемся барабане // Вестн. ТГТУ. 2017. Т. 23. № 22. С. 280-286.
- Першин В.Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1990. 166 с.
- Васильев С.Б., Колесников Г.Н., Никонова Ю.В., Раковская М.И. Исследование закономерностей изменения силы соударения с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2008. № 185. С. 195.
- Никонова Ю.В. Некоторые закономерности распределения сил контактного взаимодействия балансов и корпуса корообдирочного барабана как результат численного моделирования // Новые информ. технологии в целлюлозно-бумажной пром-сти и энергетике: материалы VIII Международ. науч.-технической конф. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. С. 49-50.
- Классен В.К., Борисов И.М. Моделирование технологических процессов, протекающих в цементных вращающихся печах // Вестн. БелГТАСМ. 2001. № 1. С. 16-21.
- Локштанов Б.М., Бачериков И.В., Суворова Н.А., Костюков И.И., Орлов В.В. Устройство для изготовления топливной щепы из лесосечных отходов: пат. на полезную модель № 141391 РФ / С.-Петербург. гос. лесотехн. ун-т им. С.М. Кирова; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16.
- Baroth R. Literature review of latest development of wood debarking // University of Oulu, Control Engineering Laboratory. Report A. 2005. № 27. 29 p.
- Öman M. Influence of log characteristics on drum debarking of pulpwood // Scandinavian Journal of Forest Research. 2000. V. 15. № 4. P. 455-463.

References

- Online store of garden, snow removal, municipal, power and construction equipment. URL: <http://kinggarden.ru/mobilnye-sortirovshiki-i-proseivateli-othodov/grohot-sortirovochnaya-ustanovka-barabannogo-tipa-komptech-primus-mobilnyy.html> (data obrashcheniya: 05.11.2021).
- Open JSC "Elektrostal Heavy Machinery Plant". URL: <http://www.eztm.ru/catalog/tsementnoe-oborudovanie/vrashchayushchiesya-pechi/> (data obrashcheniya: 06.11.2021).
- Zenkov R.L. Mechanics of bulk cargo. M.: Mashinostroenie, 1964. 254 p.
- Kantorovich Z.V. Chemical Industry machines. M., Mashinostroenie, 1965. 415 p.
- Hodorov E.I. Cement Industry Furnaces. L.: Strojizdat, 1968. 456 p.
- Hodorov E.I. The problem of studying the movement of material in rotating furnaces // Cement. 1979. № 1. P. 10-20.
- Lokshtanov B.M. Investigation of the process of birch wood debarking in drums: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk:

- 05.21.01 / Marijsk. politekhn. in-t im. M. Gor'kogo. Joshkar-Ola, 1973. 25 p.
8. Lokshtanov B.M., Surkov V.I., ZHidkov A.V. To the mathematical description of the process of debarking wood in continuous drums // *Avtomatizaciya, mekhanizaciya, pribornoje i apparatnoje oformlenie processov cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva: sb. tr. VNIIB. L., 1977. Vyp. 71. P. 111-115.*
 9. Selivanov YU.T. Movement of bulk material in the longitudinal and crosssections of the drum classifier // *Transactions of the Tambov State Technical University. 2016. V. 22. № 4. P. 615-622.*
 10. Selivanov YU.T., Rodionov YU.V., Ryzhkin V.YU., Pozdnikin A.O. Investigation of the influence of axial motion on the process of classification of bulk materials in a rotating drum // *Transactions of the Tambov State Technical University. 2017. V. 23. № 22. P. 280-286.*
 11. Pershin V.F. Drum type machines: fundamentals of theory, calculation and design. Voronezh: Izd-vo Voronezh. un-ta, 1990. 166 p.
 12. Vasil'ev S.B., Kolesnikov G.N., Nikonova YU.V., Rakhovskaya M.I. Investigation of the patterns of changes in the impact force in order to reduce losses during the debarking of wood in the drum // *Izvestia SPbLTA. 2008. № 185. P. 195.*
 13. Nikonova YU.V. Some regularities of the distribution of forces of the contact interaction of the balances and the body of the crown drum as a result of numerical modeling // *Novye inform. tekhnologii v cellyulozno-bumazhnoj prom-sti i energetike: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. Petrozavodsk: PetrGU, 2008. P. 49-50.*
 14. Klassen V.K., Borisov I.M. Modeling of technological processes occurring in cement rotary kilns // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2001. № 1. P. 16-21.*
 15. Lokshtanov B.M., Bacherikov I.V., Suvorova N.A., Kostyukov I.I., Orlov V.V. A device for making fuel chips from logging waste: pat. na poleznuyu model' № 141391 RF / S.-Peterb. gos. lesotekhn. un-t im. S.M. Kirova; opubl.10.06.2014. Byul. № 16.
 16. Baroth R. Literature review of latest development of wood debarking // *University of Oulu, Control Engineering Laboratory. Report A. 2005. № 27. 29 p.*
 17. Öman M. Influence of log characteristics on drum debarking of pulpwood // *Scandinavian Journal of Forest Research. 2000. V. 15. № 4. P. 455-463.*