

УДК 622.742

**Е. Г. Федарович, А. Э. Левданский**

Белорусский государственный технологический университет

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРОХОЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА В БАРАБАННОМ ГРОХОТЕ**

В статье рассмотрен процесс грохочения твердых продуктов пиролиза. Предложено использовать в качестве агрегата для классификации на фракции твердых продуктов пиролиза барабанный грохот. При помощи трехмерного моделирования и теоретических расчетов с применением теории вероятности определена и экспериментально обоснована оптимальная частота вращения грохота. На разработанной и изготовленной экспериментальной установке проведены исследования с целью получения графических зависимостей влияния физических свойств твердых продуктов пиролиза на эффективность грохочения в барабанном грохоте. На основании графических зависимостей сделаны выводы о рациональных параметрах процесса грохочения твердых продуктов пиролиза. Проведены теоретические исследования влияния наличия перемешивающих устройств на эффективность разделения на фракции в барабанном грохоте. Даны рекомендации по использованию перемешивающих устройств для фракционирования твердых продуктов пиролиза.

**Ключевые слова:** грохочение, твердые продукты пиролиза, барабанный грохот, эффективность грохочения, частота вращения, влажность, подрешетный продукт.

**Для цитирования:** Федарович Е. Г., Левданский А. Э. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса грохочения твердых продуктов пиролиза в барабанном грохоте // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 2 (271). С. 42–49. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-6.

**E. G. Fedarovich, A. E. Levdanski**

Belarusian State Technological University

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS SCREENING OF SOLID PYROLYSIS PRODUCTS IN A DRUM SCREEN**

The article deals with the screening process of complex pyrolysis products. It is envisaged to use drum screen as a unit for separation into fractions of pyrolysis products of drum screen. With the help of three-dimensional modeling and theoretical calculations using the theory of probability, calculated and experimentally validated screen model. On the developed and manufactured experimental psychological installation, studies were carried out with obtaining graphic dependencies, the study of physical properties pursues the goal of pyrolysis on the efficiency of screening in a drum screen. On the basis of graphic dependences, there are conclusions about the available parameters of the screening process of special pyrolysis products. Theoretical studies have been carried out on the presence of side effects on the effectiveness of selection in a drum screen. Recommendations are given for the use of sequential devices for the fractionation of complex pyrolysis products.

**Keywords:** screening, solid pyrolysis products, drum screen, screening efficiency, rotation frequency, humidity, undersize product.

**For citation:** Fedarovich E. G., Levdanski A. E. Theoretical and experimental study of the process screening of solid pyrolysis products in a drum screen. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2023, no. 2 (271), pp. 42–49. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-271-2-6 (In Russian).

**Введение.** Процессы грохочения широко применяются в производственной деятельности человека. Почти 95% добываемого и перерабатываемого сыпучего сырья подвергается разделению по крупности, которое осуществляется на грохотах [1].

Процессы грохочения достаточно часто применяются в таких отраслях промышленности,

как горная, строительная, металлургия, химическая, пищевая и фармацевтическая [2].

В настоящее время одним из перспективных вторичных материалов являются твердые продукты пиролиза (далее – ТПП), в частности твердые отходы нефтепереработки. Ценность данных материалов обусловлена несколькими факторами. Во-первых, их получение связано с

использованием экономически выгодного и экологически безопасного метода пиролиза. Во-вторых, полученные в ходе пиролиза продукты в виде жидких, газообразных и твердых материалов ввиду своих химико-физических свойств могут быть применены в различных отраслях промышленности.

Использование твердых продуктов пиролиза требует их дополнительной переработки, обязательно включающей стадию разделения по гранулометрическому составу в зависимости от требований предоставляемой соответствующей технологией.

В связи с вышеизложенным можно утверждать, что исследование процесса грохочения ТПП является актуальной научной и практической задачей.

**Основная часть.** На сегодняшний день для классификации сыпучих материалов по фракционному составу применяется большое разнообразие механических грохотов. Наиболее распространенными в настоящее время являются: качающиеся, полувибрационные (гирационно-эксцентриковые), вибрационные (с простым дебалансным вибратором, с самобалансным вибратором, резонансные, ультразвуковые, электромагнитные), барабанные, валковые и колосниковые [3–5].

Изучив данные агрегаты, было установлено, что наиболее подходящим аппаратом для фракционирования ТПП является цилиндрический барабанный грохот. В настоящее время он находит широкое применение в горнодобывающих, строительной и деревообрабатывающих отраслях, а также в коммунальном хозяйстве для сортировки измельченных промышленных и бытовых отходов, что говорит об универсальности конструкции. Главным достоинством барабанного грохота является отсутствие качающихся масс, таких как, например, у вибрационных и плоских качающихся грохотов. Эта отличительная особенность позволяет устанавливать данные агрегаты на верхних этажах, не опасаясь возникновения динамических нагрузок. Простота механической конструкции в сравнении с валковыми и гирационными грохотами позволяет получать высококачественную продукцию при оптимальных материальных затратах за счет снижения стоимости и уменьшения времени простоя оборудования при его обслуживании. Также важным достоинством данного аппарата является низкий уровень шума и безопасность эксплуатации, что связано с небольшой скоростью вращения барабана.

Для изучения процесса механической классификации ТПП на криволинейных поверхностях нами была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Экспериментальная установка для исследования процесса классификации состоит из perforированного вращающегося барабана 1 диаметром 0,5 м и длиной 1 м, закрепленного на валу 2 крестовинами 3 и с помощью подшипниковых узлов 4 установленного на опорной раме 5. Вал 2 посредством ременной передачи соединен с электродвигателем 6, который подключен к частотному преобразователю 7.

В загрузочной части барабана установлен шнековый питатель 8 с электродвигателем 9 и частотным преобразователем 10. Вдоль всей просеивающей поверхности 1 расположен бункер мелкой фракции 11. В разгрузочной части барабана установлен бункер крупной фракции 12.

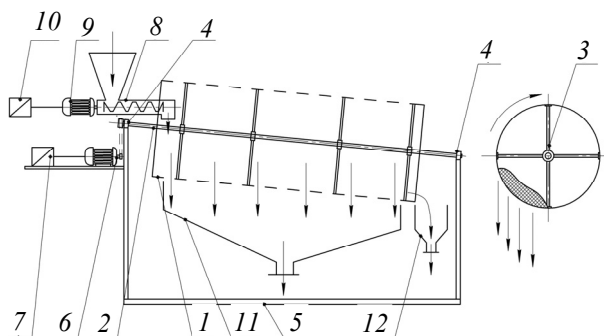


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса механической классификации ТПП:

- 1 – просеивающая поверхность (барабан); 2 – вал; 3 – крестовина барабана; 4 – подшипниковые узлы; 5 – опорная рама; 6 – электродвигатель барабана грохота; 7 – частотный преобразователь электродвигателя барабана грохота; 8 – шнековый питатель; 9 – электродвигатель шнекового питателя; 10 – частотный преобразователь электродвигателя шнекового питателя; 11 – бункер мелкой фракции; 12 – бункер крупной фракции

Подлежащий фракционированию материал через шнековый питатель 8 поступает на внутреннюю часть просеивающей поверхности барабана 1. Барабан приводится во вращение при помощи электродвигателя 6 и подключенного к нему частотного преобразователя 7. При этом количество подаваемого материала в барабан регулируется частотой вращения шнека посредством электродвигателя 9, соединенного с частотным преобразователем 10. При вращении барабана 1 материал силой трения увлекается на некоторую высоту и затем сползает вниз. Поскольку барабан устанавливается с небольшим наклоном в сторону приемного бункера 12, частицы при движении вниз одновременно продвигаются к выходному концу барабана. При движении и происходит разделение материала по крупности. Нижняя фракция, пройдя через отверстия сита (диаметр отверстий 7,7 мм), скапливается в бункере 11, а крупная (верхняя) поступает в бункер 12.

Основным показателем, характеризующим режим работы барабанного грохота, является его частота вращения. При низкой скорости вращения барабана движение материала по просеивающей поверхности будет ограничено преобладанием силы тяжести перед силой трения, в результате угол подъема частиц  $\beta$  будет небольшим. Что приведет к низкой эффективности процесса классификации за счет малого процента использования поверхности сита. Увеличение же частоты вращения выше оптимального будет способствовать «каскадному» режиму работы, вследствие чего материал, поднимаясь по поверхности сита за счет силы трения выше критического угла, будет падать за счет силы тяжести на материал, находящийся в нижней части барабана. В результате за счет ударного воздействия будет происходить разрушение кусков материала, что вызовет изменение фракционного состава готовых порошков и дополнительное пылеобразование.

Рассмотрим движение одиночной частицы по цилиндрической поверхности (рис. 2). В начальный момент времени частица находится в положении «0», где угол подъема  $\beta$  равен  $0^\circ$ . При этом очевидно, что отверстие сита (находящееся под частицей) относительно горизонта расположено под углом  $\alpha_0 = 0^\circ$ . В данном случае прохождение частицы через отверстие сита происходит под углом  $\gamma_0 = 90^\circ$ . За счет вращения барабана с некоторой скоростью  $\omega$  частица силами трения вовлекается цилиндрической поверхностью на некоторую высоту до тех пор, пока силы трения и тяжести не будут равны между собой (положение «1»). В данном случае за счет увеличения угла подъема  $\beta_1$  отверстие сита расположено под некоторым углом  $\alpha_1$ , а прохождение частицы через отверстие сита происходит под углом  $\gamma_1 = 90 - \alpha_1$ . Далее за счет преобладания сил тяжести частица падает вниз, но за счет действия сил трения она располагается в некотором промежуточном положении между позициями «0» и «1» (положение «2»). В результате повторения циклов поднятия и опускания частицы при постоянном вращении цилиндрической поверхности основной процесс грохочения происходит в области между точками «1» и «2».

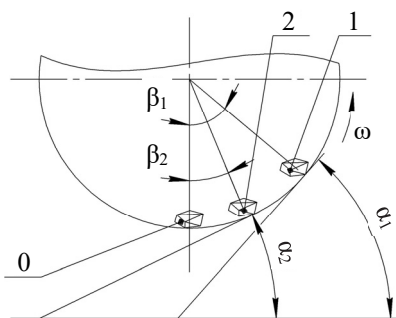


Рис. 2. Положение частицы при вращении цилиндрической поверхности

Для оценки возможности прохождения частицы через отверстие сита под различными углами  $\gamma$  были произведены расчеты, согласно теории вероятности (табл. 1).

Таблица 1  
Вероятность прохождения частицы размером  $d$  через отверстия сита

$d$ , мм	Угол прохождения частиц $\gamma$			
	$20^\circ$	$40^\circ$	$60^\circ$	$80^\circ$
7	0	0	0	0,046
6	0	0	0,035	0,096
5	0	0	0,101	0,141
4	0,068	0,153	0,178	0,187
3	0,076	0,157	0,182	0,189
2	0,109	0,175	0,195	0,201
1	0,167	0,206	0,217	0,221

Также в данной работе учитывалась толщина просеивающей поверхности (рис. 3).

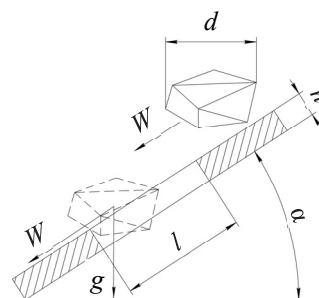


Рис. 3. Влияние толщины просеивающей поверхности на вероятность прохождения частицы через отверстие

Из схемы, представленной на рис. 3, следует, что размер частицы, которая может пройти через отверстие сита, определяется как:

$$d = l \cos \alpha - h \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $l$  – диаметр отверстий сита, мм;  $h$  – толщина просеивающей поверхности, мм.

Установлено, что при уменьшении угла прохождения частиц меньше  $40^\circ$  вероятность прохождения частиц больше 4,18 мм отсутствует, что сопоставимо с ранее проведенными расчетами, представленными в табл. 1.

Далее используя программу трехмерного моделирования, были определены значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 2) для грохота, работающего при следующих частотах вращения барабана: 7, 14, 20, 30, 35, 40 об/мин. По найденным значениям рассчитывали основные параметры классификации.

Для моделирования использовалась программа Rocky, основанная на методе дискретных элементов (DEM). В качестве модели выступал цилиндр диаметром 0,5 м и длиной 1 м.

Материалом для эксперимента служили частицы в виде полиэдров, состоящих из 10 граней, с истинной плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup>. Взаимодействие поверхности барабанного грохота с частицами материала характеризуется коэффициентом трения, равным 0,55.

В табл. 2 представлены рассчитанные параметры процесса классификации.

Таблица 2

**Расчетные параметры процесса грохочения**

$\nu$ , об/мин	$Q$ , т/ч	$\omega_0$ , м/с	$\beta$ , °	$\Pi_r$ , %	$\Pi_n$ , %
7	0,13	0,047	28–42	3,82	85,71
14	0,26	0,097	26–47	5,73	66,67
20	0,37	0,14	21–53	8,92	59,38
25	0,46	0,18	19–60	11,15	52,14
30	0,55	0,21	18–67	13,38	44,90
35	0,65	0,24	0–74	20,38	54,05
40	0,74	0,27	0–82	22,93	48,78

*Примечание.*  $\nu$  – частота вращения барабана, об/мин;  $Q$  – производительность, т/ч;  $\omega_0$  – скорость движения материала вдоль барабанного грохота, м/с;  $\beta$  – угол подъема частиц по просеивающей поверхности, °;  $\Pi_r$  – поверхность грохочения, %;  $\Pi_n$  – доля от поверхности грохочения, позволяющей просеивать материал с гранулометрическим составом 4–7 мм, %.

При частоте вращения 25 об/мин, при максимальном угле отклонения частицы  $\beta = 60^\circ$  сохраняется достаточно высокая вероятность прохождения частиц размером 1–4 мм, равная 0,153–0,206. В результате вся поверхность грохочения используется для классификации. При этом, в отличие от частоты вращения грохота 7–20 об/мин, сохраняется более высокая производительность (рис. 4).

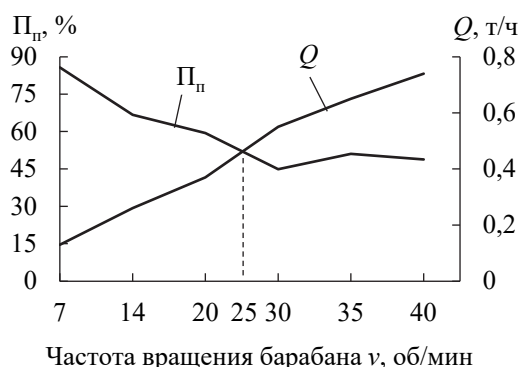


Рис. 4. Определение оптимальной частоты вращения барабана

Полноту разделения на фракции определяли при помощи расчета эффективности грохочения [6]:

$$E = \frac{\beta_{исх} - \beta_{кон}}{\beta_{исх} \cdot (100 - \beta_{кон})} \cdot 10^4, \quad (2)$$

где  $\beta_{исх}$  – содержание мелкой фракции в исходном материале, %;  $\beta_{кон}$  – содержание мелкой фракции в конечном надрешетном продукте, %.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований влияния частоты вращения барабана грохота на эффективность разделения ТПП.

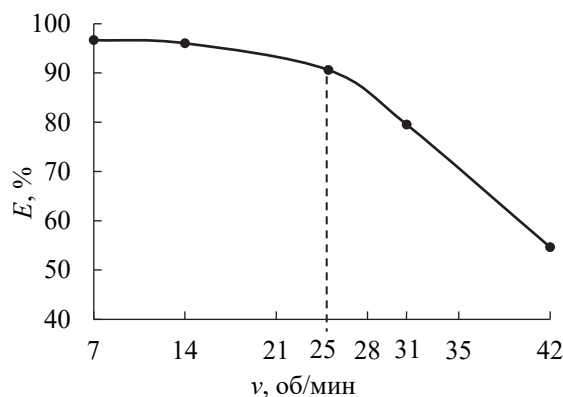


Рис. 5. Графическая зависимость эффективности грохочения при различной частоте вращения барабана

В экспериментальных исследованиях ТПП состояли из 30% подрешетного материала.

Установлено, что эффективность грохочения при изменении частоты вращения барабана от 7 до 25 об/мин снижается от 96,7 до 90,6%. Дальнейшее увеличение частоты вращения от 25 до 42 об/мин приводит к резкому уменьшению эффективности процесса разделения до 54,6%. Следовательно, наиболее рационально проводить процесс классификации ТПП при частоте вращения 25 об/мин, что согласуется с полученными расчетными данными.

На эффективность процесса грохочения существенно влияют свойства исходного материала: наличие «легких» и «трудных» зерен, соотношение надрешетного и подрешетного продуктов, влажность. Поэтому следующим этапом исследований было экспериментальное изучение влияния свойств ТПП на эффективность грохочения.

Исходная смесь готовилась следующим образом: ТПП подвергались рассеву на фракции 3–4 (мелкая фракция) и 8–20 мм (крупная фракция), затем перед началом грохочения в исходной смеси изменялось количество мелкой фракции от 10 до 90% с шагом 10%. Полученная сырьевая смесь подвергалась грохочению при частоте вращения барабана 25 об/мин.

На рис. 6 показана графическая зависимость влияния количества мелкой фракции в исходном материале на эффективность грохочения.

Из графической зависимости (рис. 6) видно, что эффективность грохочения в барабанном грохоте с увеличением в исходном материале мелкой фракции возрастает до определенного

значения. Дальнейшее увеличение количества надрешетного продукта в исходном сырье приводит к снижению эффективности классификации. Максимальное значение эффективности грохочения  $E = 88,24\%$  достигается при  $\beta_{исх} = 40\%$ , а минимальные значения  $E = 83,50\%$  и  $E = 81,68\%$  – соответственно при  $\beta_{исх} = 10\%$  и  $\beta_{исх} = 90\%$ .

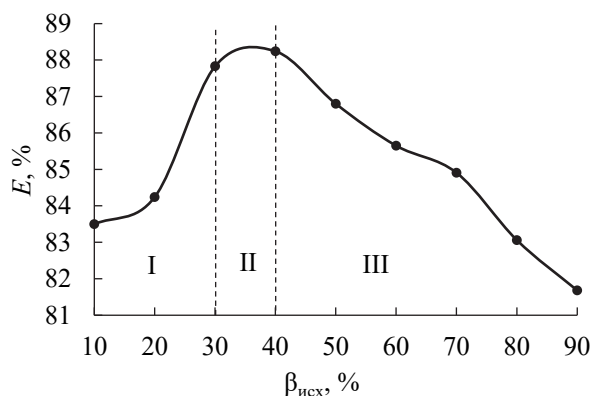


Рис. 6. Графическая зависимость эффективности грохочения при различном содержании мелкой фракции в исходном материале

На данной кривой (рис. 6) можно выделить три участка: I –  $\beta_{исх} = 10\text{--}30\%$ ; II –  $\beta_{исх} = 30\text{--}40\%$ ; III –  $\beta_{исх} = 40\text{--}90\%$ :

I – процесс грохочения сопровождается явлением сегрегации, т. е. разделением материала по крупности. В результате верхний слой состоит из крупных частиц, а мелкая фракция проходит сквозь толщину слоя материала и движется к просеивающей поверхности [7]. При высоком содержании верхнего класса в исходном материале (70–90%) крупные частицы образуют «толстый» слой (высота слоя частиц больше удвоенного диаметра отверстий), в котором частицы активно взаимодействуют друг с другом, вследствие чего процесс прохождения мелкой фракции к просеивающей поверхности затрудняется;

II – снижение количества крупной фракции до 60% способствует повышению эффективности грохочения за счет уменьшения высоты слоя материала, состоящего из крупных частиц. В результате мелкая фракция с легкостью достигает просеивающей поверхности грохота;

III – дальнейшее увеличение мелкой фракции в исходном материале приводит к повышенному содержанию в массе «трудных» зерен, размер которых больше  $3/4$  диаметра отверстий сит (5,8–7,7 мм) [8]. Данные частицы с трудом проходят через отверстия сита, в результате чего задерживаются на его поверхности, затрудняя перемещение более мелких зерен к отверстиям сита.

Определение влияния влажности ТПП  $W$  на эффективность грохочения осуществлялось следующим образом: ТПП, состоящие из 40% мелкой фракции, равномерно увлажняли водой от 5 до 35% с шагом 5%. После увлажнения материал тщательно перемешивали и выдерживали в течение 10–30 мин. С увеличением влажности материала время выдержки росло. Далее увлажненные ТПП подвергались классификации на барабанном грохоте при частоте вращения грохота 25 об/мин.

На рис. 7 представлена графическая зависимость влияния влажности ТПП на эффективность грохочения.

Анализируя полученную зависимость, установлено, что с увеличением влажности ТПП эффективность грохочения снижается. Увеличение влажности более 15% приводит к резкому снижению качества разделения. Так, при изменении влажности от 15 до 20% эффективность грохочения уменьшается от 80,26 до 65,52%.

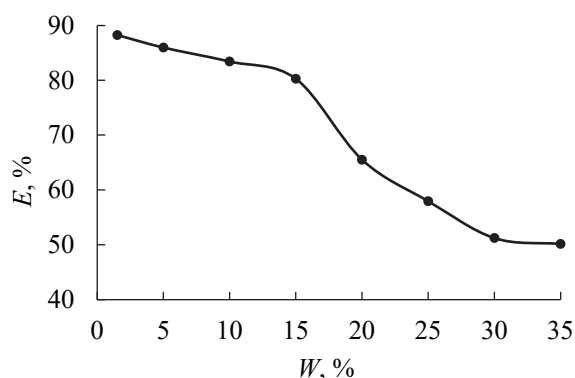


Рис. 7. Графическая зависимость влияния влажности ТПП на эффективность грохочения

Это объясняется тем, что мелкие частицы, входящие в состав ТПП, имеют наибольшую внешнюю влажность по сравнению с крупными кусками из-за их большей удельной поверхности. Внешняя влага приводит к агрегации мелких частиц, налипанию их на крупные частицы и замазыванию отверстий сит вязким материалом. Данное явление препятствует расслоению материала по крупности на поверхности сита и уменьшает рабочую поверхность разделения зерен через отверстия, в результате чего они остаются в надрешетном продукте. При увеличении влажности от 30 до 35% эффективность грохочения изменяется незначительно (51,03–50,56%). В данной области наблюдается переход от сухого грохочения к мокрому. Дальнейшее увеличение влажности приведет к интенсификации процесса классификации за счет повышения подвижности зерен при мокром грохочении.

Теоретические исследования влияния наличия перемешивающих устройств на эффективность классификации ТПП в барабанном грохоте осуществлялись при помощи трехмерного моделирования.

Трехмерная модель грохота представляла собой цилиндрический барабан диаметром 0,5 м, толщиной стенки 0,001 м, длиной 0,25 м (рис. 8). В барабане сделаны отверстия диаметром 7,7 мм, центры которых расположены в вершинах правильного треугольника. Живое сечение поверхности барабана составляло 0,45. По внутренней поверхности барабана выполнены перемешивающие устройства (8 шт.), высота которых изменялась следующим образом: 10, 25, 35 мм. Физические свойства частиц аналогичны ранее выбранным при моделировании. Гранулометрический состав исходного материала состоял из частиц размером 5, 9, 20 и 35 мм.

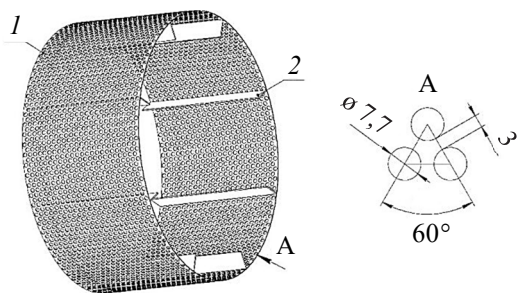


Рис. 8. Трехмерная модель:  
1 – барабан; 2 – перемешивающие перегородки

На рис. 9 показаны траектории движения частиц при различной высоте перемешивающих устройств.

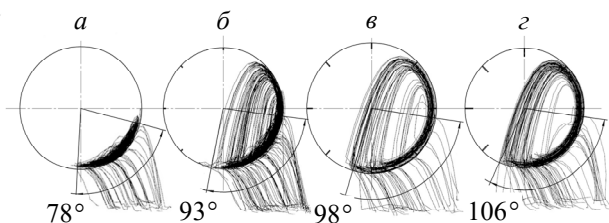


Рис. 9. Траектории движения частиц при различной высоте перемешивающих устройств:  
а – без перемешивающих устройств;  
б, в, г – перемешивающие устройства высотой соответственно 10, 25, 35 мм

Как видно из рис. 9, установка перемешивающих устройств позволяет увеличить процент поверхности сита, на котором происходит фракционное разделение. Так, при отсутствии перегородок он составляет 21,74%, при их наличии высотой 10 мм – 25,99%, 25 мм – 27,28% и 35 мм – 29,59% соответственно.

Также анализируя полученные траектории движения частиц, можно заметить, что при установке перемешивающих устройств с высотой меньше толщины слоя материала наблюдается постепенное и равномерное падение частиц с перегородок. В других случаях падение материала осуществляется порционно, с накоплением на перегородках значительного слоя материала.

Качество разделения материала на фракции определялось количеством материала, который прошел через поверхность сита  $\beta_{пр}$ , в зависимости от времени пребывания его в барабане  $\tau$  (рис. 10).

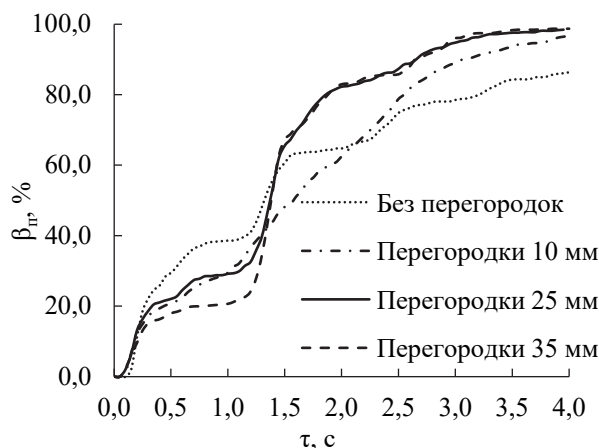


Рис. 10. Зависимость количества подрешетного продукта от времени пребывания частиц в барабане

Как видно из рис. 10, при использовании перегородок с высотой, меньше слоя материала, происходит более равномерное разделение материала на фракции на протяжении всего процесса пребывания частиц в барабане по сравнению с использованием перегородок большей высоты. Использование перегородок с высотой больше слоя материала сопровождается порционным разделением материала на фракции, что отчетливо наблюдается в промежутке времени от 1,0 до 1,5 с (рис. 10). Для перегородок высотой 35 мм рост количества подрешетного материала в данном промежутке времени составляет 46,61%, тогда как для перегородок 10 мм – 28,36%.

Полученные результаты трехмерного моделирования согласуются с результатами, ранее полученными сотрудниками Тамбовского государственного технического университета [7]. В их статье были описаны механизмы возникновения сегрегации в аппаратах барабанного типа с наличием периферийных подъемных лопастей.

Для косвенной оценки возможности разрушения частиц при грохочении были построены энергетические спектры (для частиц размером 9 мм), показывающие долю удельной энергии

частиц сыпучего материала, приходящуюся на соударения их между собой и стенкой барабанного грохота (рис. 11).

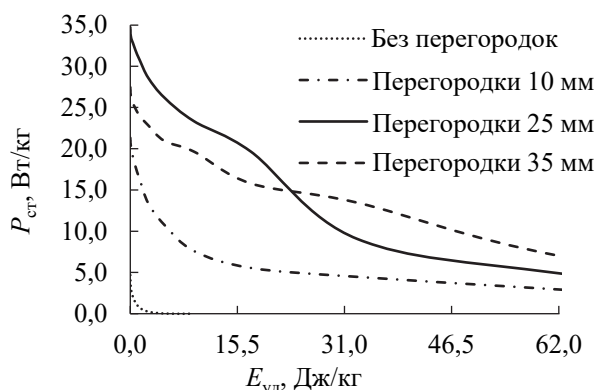


Рис. 11. Энергетические спектры:  
 $P_{ст}$  – удельная мощность столкновений;  
 $E_{уд}$  – удельная энергия

В результате построения энергетических спектров установлено, что перемешивающие устройства способствуют повышению удельной энергии, оказываемой на частицу, в 6,72 раза. При использовании продольных перегородок с высотой 10 мм количество ударов частиц с удельной энергией 62,10 Дж/кг составляет 10%. При увеличении высоты устройств количество столкновений с данной энергией возрастает: при 25 мм – 14,65%, 35 мм – 20,99%.

Увеличение удельной энергии частиц объясняется тем, что использование перегородок способствует увеличению высоты падения частиц, в результате чего они приобретают дополнительную кинетическую энергию, которая при ударе с поверхностью сита может приводить к их разрушению. При этом необходимо учитывать, что первоначально сыпаются мелкие частицы, а только затем крупные, которые за счет своей большей массы оказывают раздавливающее действие на мелкие частицы.

В результате трехмерного моделирования установлено, что перемешивающие устройства способствуют увеличению поверхности грохочения; высота перегородок, меньшая толщины слоя материала, приводит к более равномерному разделению материала на фракции по всей поверхности грохочения, в отличие от перегородок с высотой больше толщины слоя материала; наличие перегородок способствует росту удельной энергии, приходящейся на частицу.

**Заключение.** Построенные в данной работе на основании теоретических и экспериментальных исследований зависимости позволяют на практике определять рациональные параметры процесса классификации ТПП. Проведенные теоретические исследования с использованием трехмерного моделирования показывают рациональность применения перегородок с высотой меньше толщины слоя материала.

### Список литературы

1. Ким А. И. Разработка и обоснование способа интенсификации процесса грохочения сыпучих материалов: дис. ... д-ра фил. наук: 6D071200. Усть-Каменогорск, 2017. 147 с.
2. Голушкова О. В. Пружинный грохот повышенной эффективности для разделения мелкозернистых материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Могилев, 2006. 181 с.
3. Шерышев М. А., Тихонов Н. Н. Вспомогательное оборудование для переработки пластмасс. СПб.: Профессия, 2016. 592 с.
4. Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф., Перов В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301 с.
5. Семакина О. К., Горлушко Д. А. Оборудование перерабатывающих производств. Переработка минерального сырья. М.: Юрайт, 2019. 90 с.
6. Калекин В. С. Процессы и аппараты химической технологии: Массообменные и механические процессы. В 2 ч. Омск: ОмГТУ, 2007. Ч. 2. 200 с.
7. Иванов О. О., Пронин В. А., Рябова Е. А. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. № 22. С. 397–410.
8. Назимко Е. И. Конспект лекций по курсу «Подготовительные процессы обогащения». Донецк: ДонНТУ, 2008. 51 с.

### References

1. Kim A. I. *Razrabotka i obosnovaniye sposoba intensivifikatsii protsessa grokhocheniya sypuchikh materialov. Dissertatsiya doktora filosofskikh nauk* [Development and substantiation of a method for intensifying the screening process of bulk materials. Dissertation DSc (Philosophy)]. Ust-Kamenogorsk, 2017. 147 p. (In Russian).
2. Golushkova O. V. *Pruzhinnyy grokhot povyshennoy effektivnosti dlya razdeleniya melkozernistykh materialov. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Spring screen of increased efficiency for the separation of fine-grained materials. Dissertation PhD (Engineering)]. Mogilev, 2006. 181 p. (In Russian).

3. Sheryshev M. A., Tikhonov N. N. *Vspomogatel'noye oborudovaniye dlya pererabotki plastmass* [Auxiliary equipment for processing plastics]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2016. 592 p. (In Russian).

4. Andreev E. E., Bilenko L. F., Perov V. A. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopaemykh* [Crushing, grinding and screening of minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 301 p. (In Russian).

5. Semakina O. K., Gorlushko D. A. *Oborudovaniye pererabatyvayushchikh proizvodstv. Pererabotka mineral'nogo syr'ya* [Equipment for processing industries. Processing of mineral raw materials]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 90 p. (In Russian).

6. Kalekin V. S. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: Massoobmennyye i mekhanicheskiye protsessy* [Processes and apparatuses of chemical technology: Mass transfer and mechanical processes]. In 2 parts. Omsk, OmGTU Publ., 2007. Part 2. 200 p. (In Russian).

7. Ivanov O. O., Pronin V. A., Ryabova E. A. Management of segregated flows of bulk materials for their processing by methods of separation and connection. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2016, no. 22, pp. 397–410 (In Russian).

8. Nazimko E. I. *Konspekt lektsiy po kursu "Podgotovitel'nyye protsessy obogashcheniya"* [Abstract of lectures on the course "Preparatory enrichment processes"]. Donetsk, DonNTU Publ., 2008. 51 p. (In Ukraine).

### Информация об авторах

**Федарович Евгений Геннадьевич** – инженер кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: zhenya.fedorovich.1999@mail.ru

**Левданский Александр Эдуардович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alex\_levdanskyy@mail.ru

### Information about the authors

**Fedarovich Evgeniy Gennad'yevich** – engineer, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhenya.fedorovich.1999@mail.ru

**Levdanski Aleksandr Eduardovich** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alex\_levdanskyy@mail.ru

Поступила 26.04.2023