

ДВИЖЕНИЕ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИЯХ БАРАБАННОГО КЛАССИФИКАТОРА

Ю. Т. Селиванов

*Кафедра «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; soprnm@nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: барабанный классификатор; детерминировано-стохастическая модель; механическая классификация; циркуляционный контур.

Аннотация: Дано описание процесса классификации, в котором могут быть использованы детерминировано-стохастические модели. Отмечен факт перемещения материала вдоль оси барабана, а также факт уменьшения площади, занятой материалом в поперечном сечении грохота. Представлен процесс движения в барабанном классификаторе непрерывного действия, который может быть дискретным в пространстве и времени.

Механическая классификация сыпучих материалов широко применяется в химической и смежных областях промышленности, в частности при производстве минеральных удобрений. Наиболее часто используются два варианта аппаратного оформления процесса: грохочение от мелкого материала к крупному и от крупного к мелкому [1]. При высоких коэффициентах заполнения барабана наблюдается циркуляционный характер движения материала в его поперечном сечении. Описанию характера движения в данном сечении посвящено большое число научных работ [2 – 4].

Применительно к процессу классификации возможна адаптация математических моделей процесса смешивания в периодическом режиме [5 – 7], в том числе и на основе случайных марковских цепей [4, 8]. В барабанном классификаторе одновременно осуществляются два разнонаправленных процесса: смешивание частиц разного размера и их разделение на отдельные фракции. Наиболее перспективными являются детерминировано-стохастические математические модели [9].

Моделирование процесса классификации в барабанном грохоте непрерывного действия сопряжено с рядом сложностей, связанных с перемещением материала не только в поперечном сечении смесителя, но и вдоль его оси. Характер данного движения зависит как от конструкции, так и от его режимных параметров. В то же время можно выделить ряд общих закономерностей: более интенсивное смешивание-разделение в радиальном направлении грохота при достаточно ярко выраженном циркуляционном движении материала; уменьшение степени заполнения поперечного сечения грохота материалом при движении от области загрузки к области разгрузки, наряду с увеличением скорости осевого движения. Для барабанных классификаторов непрерывного действия может быть разработана единая математическая модель процесса.

Несмотря на то, что детерминированно-стохастические модели для периодического процесса не учитывают движения компонентов вдоль оси барабана, они могут быть положены в основу описания процесса непрерывного грохочения, поскольку в осевом движении сыпучего материала наблюдается достаточно ярко выраженный детерминированно-стохастический характер.

Рассмотрим основы стратегии моделирования процесса смешивания-разделения дисперсных материалов. Согласно [4], при циркуляционном движении весь материал в поперечном сечении можно разделить на поднимающийся (зона $ACBM$) и скатывающийся (зона $ACBN$) слои (рис. 1). В поднимающемся слое материал движется сплошным потоком, и смешение частиц не наблюдается, однако происходит процесс разделения частиц различных фракций. Процесс смешивания наиболее активно происходит, в основном, в скатывающемся слое.

При использовании послойной или ячеечной математических моделей на базе марковских цепей [4] в поперечном сечении барабанного грохота в начале циркуляционный контур разбивается на подслои. Объемы подслоев при продвижении от обечайки барабана к центру циркуляции уменьшаются.

Зная толщину скатывающегося слоя CN , можно весь материал разделить на n подслоев

$$n = CN/d_{\max}, \quad (1)$$

где d_{\max} – максимальный из диаметров компонентов смеси, м.

На практике применение формулы (1) в большинстве случаев дает дробный результат. Однако в дальнейших расчетах нельзя использовать дробное число подслоев, участвующих в процессе смешивания-разделения, поэтому в качестве числа подслоев используется целая часть полученного выражения, а оставшуюся дробную часть (которая меньше, чем d_{\max}) равномерно распределяют между всеми подслоями. Толщина каждого подслоя оказывается несколько большей, чем d_{\max} .

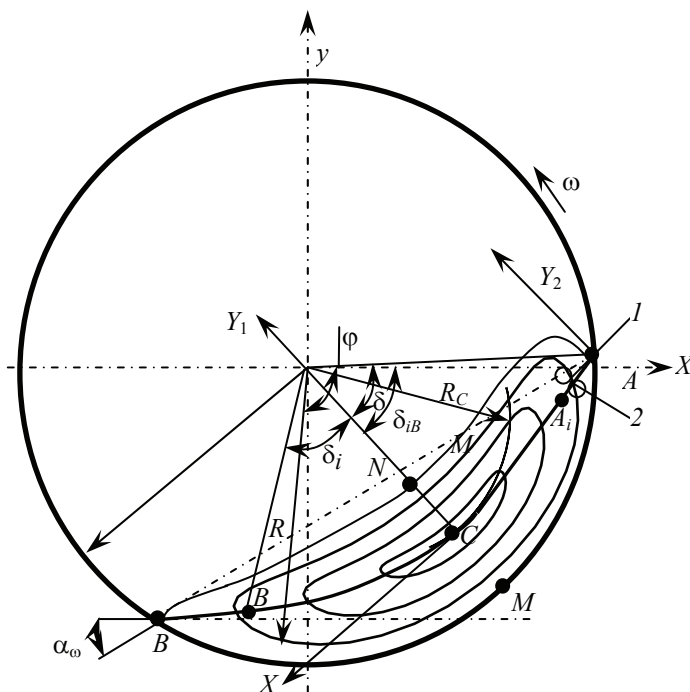


Рис. 1. Схема к определению характера движения сыпучего материала в поперечном сечении барабана

Время $\tau_{ц}$, за которое частица может совершить полный цикл циркуляции определяется, как сумма времени пребывания частицы в поднимающемся слое $\tau_{п}$ и времени пребывания в скатывающемся слое $\tau_{ск}$, с

$$\tau_{ц} = \tau_{п} + \tau_{ск}. \quad (2)$$

Для барабанного классификатора непрерывного действия продольное сечение барабана, частично заполненного компонентами смеси, изображено на рис. 2. На нем пунктиром показана линия, характеризующая положение центра циркуляции по длине классификатора. Как видно из рисунка, количество материала убывает в направлении от области загрузки барабана (слева) до области разгрузки (справа). Если провести три поперечных сечения I-I, II-II, III-III, то очевидно, что площадь, занятая циркуляционным контуром материала в сечении I-I, будет наибольшей, а площадь в сечении III-III – наименьшей. При моделировании процесса смешивания-разделения в барабанном классификаторе непрерывного действия невозможно рассматривать процесс, проходящий в фиксированном циркуляционном контуре. Необходимо учитывать факт перемещения материала вдоль оси барабана, а также факт уменьшения площади, занятой материалом в поперечном сечении грохота [10].

Эксперименты по исследованию характера распределения сыпучего материала вдоль оси барабана достаточно полно представлены в работе [10]. Однако можно констатировать отсутствие теоретической зависимости для характера распределения сыпучего материала по длине барабанного грохота. На рисунке 2 показано, что наибольшей кривизны линия распределения материала достигает на участке, расположенном правее сечения III-III, то есть близко от ссыпавшегося края конструкции. С точностью, достаточной для инженерных расчетов, можно допустить, что на участке длиной l_p данная зависимость носит линейный характер. Участок, имеющий наибольшую кривизну близи от ссыпавшегося края барабанного классификатора весьма незначителен, и можно сделать допущение о линейном характере распределения материала по всей его длине.

С учетом того, что по мере удаления от области загрузки барабана количество материала в поперечных сечениях убывает, его скорость продвижения в осевом направлении будет возрастать, поскольку выполняется условие неразрывности потока. Имеет место закономерность, связывающая количество сыпучего материала в поперечном сечении барабана с его скоростью продвижения в осевом направлении.

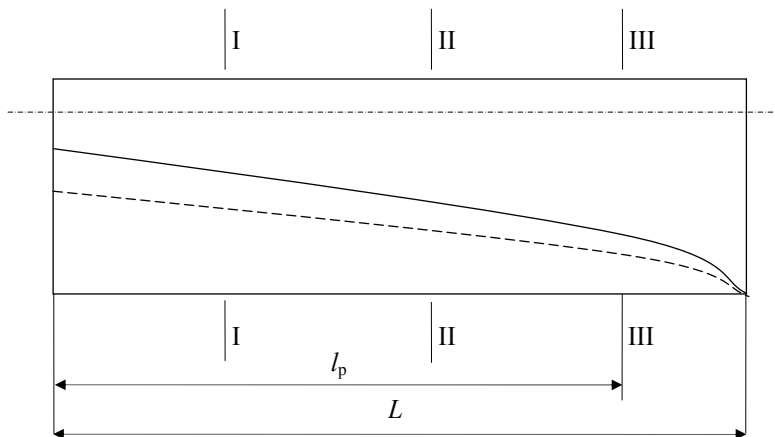


Рис. 2. Распределение сыпучего материала в продольном сечении барабанного классификатора непрерывного действия

Перемещение частиц сыпучего материала в осевом направлении происходит в скатывающемся слое, однако, по мере продвижения материала в направлении ссыпающего края уменьшается площадь, занятая частицами в поперечном сечении барабана. Как следствие, уменьшается толщина скатывающегося и поднимающегося слоев. В соответствие с зависимостью (2) величина времени цикла будет в каждом последующем сечении меньше предыдущего.

Объяснение данному факту можно получить из следующих рассуждений. Время цикла определяем, наряду с зависимостью (2), исходя из следующего выражения

$$\tau_{ц} = F/v_{ср}, \quad (3)$$

где F – площадь, занятая циркуляционным контуром в поперечном сечении барабана, m^2 ; $v_{ср}$ – средняя скорость продвижения материала в сечении CM , m/c^2 (см. рис. 1).

Эпюра скоростей в сечении имеет трапециевидальную форму и изменяется от скорости v_C в области центра циркуляции до скорости v_H в непосредственной близости от обечайки барабана:

$$v_C = \omega R_C; \quad (4)$$

$$v_H = \omega R. \quad (5)$$

где R_C – радиус центра циркуляции, m ; R – радиус барабана, m ; ω – частота вращения барабана, c^{-1} .

Средняя скорость может быть рассчитана из выражения

$$v_{ср} = \omega(R_C + R)/2. \quad (6)$$

По мере продвижения материала в направлении области разгрузки уменьшается площадь F , занятая частицами в поперечном сечении барабана, следовательно, числитель в зависимости (3) уменьшается. При этом происходит уменьшение толщин поднимающегося и скатывающегося слоев, а радиус центра циркуляции R_C увеличивается. Как следствие, согласно выражению (6), увеличивается средняя скорость $v_{ср}$ и происходит уменьшение времени цикла $\tau_{ц}$, которая непосредственно связана с объемом материала, участвующего в рассматриваемом переходе, поэтому необходимо учитывать закономерность уменьшения объема при уменьшении времени цикла.

При моделировании процесса в барабанном классификаторе непрерывного действия можно использовать в качестве исходных данных величину времени пребывания частицы сыпучего материала в барабане. Для определения объема материала, участвующего на каждом переходе в процессе классификации, необходимо установить его количество в барабане. В качестве исходных данных используем площади, занятые циркуляционным контуром в областях загрузки и разгрузки.

Если закон распределения материала вдоль оси барабана имеет линейный характер, то объем материала, находящегося в барабане, определим по зависимости

$$V = (F_H + F_K)L/2, \quad (7)$$

где F_H и F_K – площади, занятые циркуляционным контуром в торцевых сечениях барабана (начала и конца), m^2 ; L – длина барабана, m .

В рассматриваемой модели процесса классификации используется относительная скорость осевого движения. Определим, какую долю от суммарного пребывания в барабане составляет время цикла в первом сечении, при известной площади, занятой материалом в месте загрузки F_H (в сечении $i = 1$), и времени цикла $\tau_{ц, i}$

$$\tau_i = \tau_{\text{ц}i} / \tau_{\text{ц}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{ц}}$ – время пребывания частицы в барабанном классификаторе.

За время $\tau_{\text{ц}i}$ материал перемещается на определенное расстояние в осевом направлении. Считаем, что в данном переходе участвует определенный объем сыпучего материала V_i . Он может быть рассчитан как доля от суммарного объема материала V , находящегося в барабане,

$$V_i = \tau_i V. \quad (9)$$

Элементарный объем определим как произведение площади циркуляционного контура F_i (при $i = 1$ имеем $F_i = F_{\text{н}}$) на длину элементарного участка в осевом направлении. Таким образом, расстояние, на которое переместится слой материала в осевом направлении барабана на данном участке за время $\tau_{\text{ц}i}$ найдем как

$$l_i = V_i / F_i. \quad (10)$$

При переходе на следующий участок необходимо учесть уменьшение площади поперечного сечения барабана, занятой материалом, с учетом того, что она изменяется от $F_{\text{н}}$ до $F_{\text{к}}$ по линейному закону. При изменении расстояния на l_i , площадь, занятая материалом F_{i+1} , может быть рассчитана исходя из предыдущего значения F_i

$$F_{i+1} = F_i - (F_{\text{н}} - F_{\text{к}}) l_i / L. \quad (11)$$

После расчета новой площади, занятой сыпучим материалом в поперечном сечении барабана, производится пересчет конфигурации контура и соответствующего значения времени цикла $\tau_{\text{ц}(i+1)}$ и далее, по зависимостям (8) – (11), принимая вместо i значения $(i + 1)$.

Процесс движения в барабанном классификаторе непрерывного действия может быть представлен дискретным в пространстве и времени [10]. В связи с этим процесс смешивание-разделение можно считать аналогичным периодическому, но переход на каждый следующий участок должен учитывать изменение конфигурации циркуляционного контура, связанное с уменьшением площади, занятой материалом в поперечном сечении барабана.

Имеющаяся структура распределения компонентов по подслоям циркуляционного контура должна быть сохранена при уменьшении площади на каждом переходе m [10]. Для случая трехкомпонентной смеси, концентрации ключевых компонентов C_1 и C_2 – функции радиуса, определяющего положение подслоя, то есть $C_1^{(m)} = f_1(R)$; $C_2^{(m)} = f_2(R)$, где R изменяется от радиуса центра циркуляции $R_{\text{с}}$ до радиуса барабана $R_{\text{б}}$. Вследствие того, что распределение ключевых компонентов по объему смеси неодинаково, функции f_1 и f_2 различны.

Найдем концентрации ключевых компонентов в пределах каждого подслоя:

$$C_1^{(i,m)} = \frac{1}{R_{i+1} - R_i} \int_{R_i}^{R_{i+1}} f_1(R) dR; \quad (12)$$

$$C_2^{(i,m)} = \frac{1}{R_{i+1} - R_i} \int_{R_i}^{R_{i+1}} f_2(R) dR, \quad (13)$$

где i – номер подслоя, $i = 1, 2, \dots, N - 1$.

Вне зависимости от того, изменилось или нет число подслоев, функции, описывающие распределение концентраций ключевых компонентов в поднимающемся слое, должны оставаться одинаковыми, изменяются лишь величины, определяющие расположение подслоев, то есть R_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

Представим два возможных варианта пересчета концентраций ключевых компонентов по подслоям циркуляционного контура.

Первый вариант: число подслоев не уменьшается, изменяется лишь их толщина. Данный вариант реализуется при делении скатывающегося слоя на подслои по зависимости (1), когда предусматривается использование целой части числа в качестве числа подслоев, а оставшаяся дробная часть равномерно распределяется между подслоями. Дробная часть может быть маленькой, когда к объему каждого из подслоев добавляется незначительная величина, и достаточно большой, предполагающей добавление существенного объема. Следует отметить, что добавленный в каждый из подслоев объем будет пропорционален объему подслоя. Если дробная часть была достаточно большой, то при изменении площади, занятой материалом в поперечном сечении барабана, разделение циркуляционного контура на подслои может привести не к уменьшению числа подслоев, а уменьшению величины дробной части. Объемы подслоев изменяются пропорционально, если сохранить имеющуюся до пересчета структуру распределения ключевых компонентов по подслоям циркуляционного контура.

Второй вариант: в результате изменения площади, занятой сыпучим материалом в поперечном сечении барабана, происходит уменьшение числа подслоев. Необходимо пересчитать концентрации ключевых компонентов по вновь образованным подслоям циркуляционного контура с сохранением имевшейся структуры распределения. Поскольку изменение площади, занятой циркуляционным контуром вдоль оси барабана, происходит монотонно и может быть представлено прямой с небольшим углом наклона, а время цикла гораздо меньше времени пребывания частицы в барабане, максимальное уменьшение числа подслоев не может быть больше единицы. Пусть до пересчета параметров циркуляционного контура имелось q подслоев, в результате пересчета стало $(q - 1)$ подслоев, тогда ключевые компоненты «утраченного» подслоя должны быть распределены между оставшимися с сохранением имеющейся структуры распределения. Каждый вновь образованный подслей должен содержать частицы одноименного (до пересчета) слоя, а также часть частиц следующего по порядку подслоя. Превышение концентрации частиц в новом слое составит

$$r = q / (q - 1) . \quad (14)$$

Для трехкомпонентной смеси концентрация компонентов мелкой C_1 и товарной C_2 фракций в любом подслое после уменьшения их числа составит:

$$C_1^{(i,m)} = (C_0_1^{(i,m)}(r + i(1 - r)) + C_0_1^{(i+1,m)}i(r - 1)) / r ; \quad (15)$$

$$C_2^{(i,m)} = (C_0_2^{(i,m)}(r + i(1 - r)) + C_0_2^{(i+1,m)}i(r - 1)) / r , \quad (16)$$

где i – номер подслоя, $i = 1, \dots, q - 1$; $C_0_1^{(i,m)}$ и $C_0_2^{(i,m)}$ – концентрации компонентов мелкой и товарной фракций в i -м подслое до изменения их числа, соответственно; m – номер перехода. За один переход принимается промежуток времени, за который самый маленький подслей совершает полный оборот вокруг центра циркуляции.

Достоинство изложенного подхода к моделированию процесса классификации в барабанном грохоте непрерывного действия – сохранение порядка разбиения на подслои циркуляционного контура в любом поперечном сечении, то есть толщина подслоев рассчитывается по одной и той же зависимости (1).

Список литературы

1. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю. И. Гусев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 408 с.

2. Першин, В. Ф. Моделирование процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана / В. Ф. Першин // Теорет. основы хим. технологии. – 1986. – Т. 20, № 4. – С. 508 – 513.
3. Першин, В. Ф. Энергетический метод описания движения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося цилиндра / В. Ф. Першин // Теорет. основы хим. технологии. – 1988. – Т. 22, № 2. – С. 255 – 260.
4. Селиванов, Ю. Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 120 с.
5. Modeling of Particle Mixing and Segregation Processes / J. Gyenis [et al.] // Conferenc : «World Congress on Particle Technology 3», 7 – 9 July, 1998, Brighton. – UK, 1998. – 172 p.
6. Mihalko, Cs. A Double Stochastic Model of Mixing of Solids Particles / Cs. Mihalko, E. O. Mihalyko // The 3rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, 29 May – 01 June, 2000. – Israel, 2000. – Vol. 2. – P. 8.34 – 8.39.
7. Мошанский, А. И. Некоторые вопросы теории ячеечных моделей / А. И. Мошанский // Теорет. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24, № 6. – С. 743 – 754.
8. Першин, В. Ф. Модель процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана / В. Ф. Першин // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 3. – С. 370 – 377.
9. Першин, В. Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования / В. Ф. Першин. – Воронеж : Изд-во Воронеж. университета, 1990. – 166 с.
10. Першин, В. Ф. Моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в циркуляционных смесителях непрерывного действия / В. Ф. Першин, Ю. Т. Селиванов // Теорет. основы хим. технологии. – 2003. – Т. 37, № 6. – С. 629 – 635.

Movement of Bulk Material in the Longitudinal and Cross Sections of the Classifying Drum

Yu. T. Selivanov

*Department “Technical Mechanics and Car Parts”, TSTU,
Tambov, Russia; soprnm@nnn.tstu.ru*

Keywords: circulation circuit; classifying drum; deterministic-stochastic models; mechanical classification.

Abstract: Mechanical classification of bulk materials is widely applied in various industries. Modeling of this process is complicated by the fact that the bulk material continuously moves not only axially, but also in longitudinal section of the classifier. To describe the process of classification, deterministic-stochastic model can be used. When modeling the mixing-separating process in the drum classifier of continuous operation, it is impossible to consider the process that takes place in a fixed circulation circuit. It is necessary to consider the fact of movement of the material along the axis of the drum, as well as reduction in the area occupied by the material in the cross section of the separator. The process of movement in the drum classifier of continuous operation can be presented as discrete in space and time. In this regard, the process of mixing-separating can be considered similar to the periodic process, but transition to a next section along the length of the classifier must consider the change in configuration of the circulation circuit associated with a decrease in the area occupied by the material in cross-section of the drum.

References

1. Gusev Yu.I., Karasev I.N., Kol'man-Ivanov E.E., Makarov Yu.I., Makevnin M.P., Rasskazov N.I. *Konstruirovaniye i raschet mashin khimicheskikh proizvodstv* [Design and calculation machines chemical industries], Moscow: Mashinostroenie, 1985, 408 p. (In Russ.)
2. Pershin V.F. [Simulation of the process of mixing loose material in the cross section of the rotating drum], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1986, vol. 20, no. 4, pp. 508-513. (In Russ.)
3. Pershin V.F. [Energy Method describe the motion of bulk material in cross section a smooth rotating cylinder], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1988, vol. 22, no. 2, pp. 255-260. (In Russ.)
4. Selivanov Yu.T., Pershin V.F. *Raschet i proektirovaniye tsirkulyatsionnykh smesitelei sypuchikh materialov bez vnutrennikh peremeshivayushchikh ustroystv* [Calculation and design of circulation mixers of loose materials without any internal mixing devices], Moscow : Mashinostroenie-1, 2004, 120 p. (In Russ.)
5. Gyenis J., Ulbert Zs., Szepevolgyi J., Diaz E. Conferenc : "World Congress on Particle Technology 3", 7 – 9 July, 1998, Brighton, UK, 1998, 172 p.
6. Mihalko Cs., Mihalyko E.O. *The 3rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids*, 29 May – 01 June, 2000, Israel, 2000, vol. 2, pp. 8.34-8.39.
7. Moshanskii A.I. [Some questions of the theory of cell model], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1990, vol. 24, no. 6, pp. 743-754. (In Russ.)
8. Pershin V.F. [Process Model of mixing of particulate material in the transverse-section-smooth rotating drum], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 1989, vol. 23, no. 3, pp. 370-377. (In Russ.)
9. Pershin V.F. *Mashiny barabannogo tipa: osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya* [Drum machines: the basic theory, analysis and design], Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo universiteta, 1990, 166 p. (In Russ.)
10. Pershin V.F., Selivanov Yu.T. [Modeling of the mixing of particulate materials in continuous-circulating mixers], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2003, vol. 37, no. 6, pp. 629-635. (In Russ., abstract in Eng.)

Bewegung des Schüttstoffes im Längs- und Querschnitt des Trommelklassierers

Zusammenfassung: Die mechanische Klassifikation der Schüttstoffe wird in den verschiedenen Industriezweigen ziemlich breit verwendet. Die Modellierung dieses Prozesses wird damit erschwert, dass der Schüttstoff im ununterbrochenen Regime nicht nur im axialen sondern auch im längsläufigen Schnitt des Klassierers verlagert wird. Für die Beschreibung des Prozesses der Klassifikation können die deterministisch-stochastischen Modelle verwendet sein. Bei der Modellierung des Prozesses der Vermischung-Teilung im Trommelklassierer der ununterbrochenen Funktion ist es unmöglich, der in der fixierten Umlaufkontur laufende Prozess zu betrachten. Man muss

die Tatsache der Umstellung des Materials entlang der Achse der Trommel, sowie die Tatsache der Verkleinerung der Fläche des Materials im Querschnitt des Siebapparates berücksichtigen. Der Prozess der Bewegung im Trommelklassierer der ununterbrochenen Funktion kann als diskret im Raum und in der Zeit dargestellt sein. In diesem Zusammenhang kann man den Prozess der Vermischung-Teilung ähnlich dem periodischen Prozess halten, aber der Übergang auf jedes folgenden Stück nach der Länge des Klassierers soll die mit der Verkleinerung der Fläche des Materials im Querschnitt der Trommel verbundene Veränderung der Konfiguration der Umlaufkontur berücksichtigen.

Mouvement du produit en vrac dans une section longitudinale et transversale du classificateur de tambour

Résumé: La classification mécanique des matériaux en vrac est assez largement appliquée dans diverses industries. La modélisation de ce processus est compliquée par le fait qu'en mode continu, le matériau en vrac se déplace non seulement dans le sens axial, mais aussi dans la section longitudinale du classificateur. Pour décrire le processus de la classification peuvent être utilisés les modèles déterminés stochastiques. Lors de la modélisation du processus du mélange et de la séparation dans le classificateur de tambour de l'action continue il est impossible de considérer le processus se passant dans le circuit de circulation fixe. Il faut prendre en compte le fait du déplacement le long de l'axe du tambour, ainsi que le fait de la réduction de la place occupée par le matériel dans la section transversale du cribleur. Le processus du mouvement dans le classificateur de tambour de l'action continue peut être représenté comme discret dans l'espace et dans le temps. A cet égard, le processus de mélange-séparation peut être considéré analogue au celui périodique, mais la transition sur chaque parcelle par la longueur du classificateur doit tenir compte de la modification de la configuration du circuit de circulation liée avec la réduction de l'espace occupé par le matériau dans une section transversale du tambour.

Автор: *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
