

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА  
ВДОЛЬ ОСИ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ**

**В. Ф. Першин, Ю. Т. Селиванов, А. В. Орлов**

*Кафедра «Прикладная механика и сопротивление материалов», ТГТУ*

**Ключевые слова и фразы:** барабанный смеситель; объем и вес пробы; пробоотборник; экспериментальная установка.

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы, связанные с моделированием процесса смешивания в барабанном смесителе непрерывного действия. Исследуется и анализируется характер распределения сыпучего материала по длине барабана. По результатам экспериментальных исследований с различными компонентами делается вывод о том, что при моделировании процесса непрерывного смешивания характер распределение материала по длине барабана можно считать линейным.

---

При приготовлении смесей сыпучих материалов из компонентов, склонных к сегрегации, в барабанных смесителях не всегда удастся получить достаточно высокое качество готового продукта [1]. В связи с этим возникает необходимость прогнозирования конечного результата проведения процесса – качества готовой смеси и выбора режима проведения процесса, обеспечивающего повышение этого качества.

Для достижения поставленной цели разработан целый ряд математических моделей процесса смешивания в барабанных смесителях периодического действия [2, 3, 4], в том числе и для многокомпонентных смесей [5].

Результаты предварительных экспериментов показывают, что указанные математические модели могут быть адаптированы для смесителей непрерывного действия, однако необходимо учитывать характер распределения сыпучего материала вдоль оси барабана. Как известно [1], при малых относительных угловых скоростях вращения барабана сыпучий материал в поперечном сечении распределен в виде кругового сегмента. По мере продвижения от загрузочного края барабана к разгрузочному площадь сегмента уменьшается. Это обуславливает необходимость пересчета меняющихся параметров циркуляционного контура в различных поперечных сечениях барабана. Поскольку выполняется закон сохранения вещества, скорость осевого продвижения частиц должна увеличиваться.

Исследованию характера распределения сыпучего материала вдоль оси барабана посвящена работа [6]. В ней отмечается, что по результатам измерения высоты слоя сыпучего материала, за исключением сравнительно небольшого участка длины, прилегающего к ссыпающему краю барабана, характер изменения этого параметра близок к линейному. Если конструкция имеет подпорное кольцо на ссыпающем краю, то можно сделать допущение о линейном характере распределения по всей длине барабана. Однако, не совсем ясно, насколько можно считать линейным изменение площади сегмента. Более того, конкретных экспериментальных данных, подтверждающих указанный характер распределения материала, в технической литературе не обнаружено.

С учетом линейного убывающего характера распределения материала вдоль оси барабана объем материала можно определить из выражения

$$V = (S_n + S_k) \cdot L/2, \quad (1)$$

где  $S_n$  и  $S_k$  – площади, занятые циркуляционным контуром в торцевых сечениях барабана;  $L$  – длина барабана.

Время, за которое частица может совершить полный оборот вокруг центра циркуляции в поперечном сечении барабана, складывается из ее времени пребывания в поднимающемся  $t_n$  и скатывающемся  $t_{ck}$  слоях и называется временем цикла

$$t_{ц} = t_n + t_{ck}. \quad (2)$$

Существует прямая зависимость между площадью, занятой циркуляционным контуром материала в поперечном сечении барабана, и временем цикла. При уменьшении первой величины происходит и уменьшение второго параметра [7]. Необходимо также отметить, что величина  $t_{ц}$  непосредственно связана с объемом материала, участвующего в рассматриваемом переходе, поэтому необходимо учитывать уменьшение объема материала при уменьшении времени цикла на каждом переходе.

В представленной модели процесса смешивания используется относительная скорость осевого движения материала. Для этого определяется, какую долю от суммарного времени пребывания в смесителе составляет время цикла в первом сечении. В связи с тем, что нам известна площадь, занятая материалом в месте загрузки компонентов  $S_n$  и время цикла  $t_{ц}$  [7], соответствующее этой площади, то эта доля может быть рассчитана следующим образом:

$$i = t_{ц} / T, \quad (3)$$

где  $T$  – время пребывания частицы в барабанном смесителе.

За время  $t_{ц}$  сыпучий материал переместится на определенное расстояние вдоль оси барабана, поэтому можно рассчитать объем материала, участвующего на данном переходе. Его величина может быть рассчитана как доля от суммарного объема сыпучего материала, находящегося в барабанном смесителе

$$v = i \cdot V. \quad (4)$$

Результаты расчетов по математической модели показывают, что величина  $i$  достаточно мала и, как следствие, количество участков по длине барабана очень велико, поэтому при расчете пути, пройденной частицами в осевом направлении барабана за время  $t_{ц}$  можно сделать допущение о том, что в пределах этого времени площадь поперечного сечения, занятая сыпучим материалом, остается неизменной. Расстояние, на которое переместится слой материала в осевом направлении на этом переходе за время  $t_{ц}$  определяется зависимостью

$$l = v / S. \quad (5)$$

В первом сечении  $S = S_1 = S_n$ . При переходе на следующий участок необходимо произвести пересчет площади циркуляционного контура, исходя из линейного характера распределения этой величины. Если нам известна площадь сечения  $S_1$ , то на расстоянии  $l$  эта величина изменится и составит

$$S_{ц} = S_1 - (S_n - S_k) \cdot l/L. \quad (6)$$

После расчета этой величины производится пересчет соответствующей ей конфигурации циркуляционного контура и нового времени цикла  $t_{ц}$  и далее по зависимостям (3)-(6), принимая  $S = S_{ц}$ .

Как видно из приведенных выше рассуждений, принципиальным моментом в моделировании процесса смешивания является допущение о линейном характере распределения сыпучего материала вдоль оси барабана. Исследованию этого вопроса были посвящены проведенные нами экспериментальные исследования. Цель экспериментов – доказать, что в диапазоне, установленном для работы барабанных смесите-

лей, можно говорить о линейном характере распределения сыпучего материала вдоль его оси.

В реальных условиях работы данного вида оборудования циркуляционное движение материала наблюдается в диапазоне изменения угловых скоростей вращения барабана  $(0,1 \div 0,6) \omega_{кр}$ , где  $\omega_{кр}$  – критическая угловая скорость, при которой отдельная частица материала начинает вращаться вместе с обечайкой барабана. На практике для расчета величины  $\omega_{кр}$  обычно используют зависимость

$$\omega_{кр} = \sqrt{g/R}, \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – радиус барабана.

В разработанных математических моделях характер движения мы рассматриваем как детерминированно-стохастический. В технических рекомендациях по проведению процесса следует стремиться к росту детерминированной составляющей, поэтому при проведении экспериментальных исследований угловая скорость вращения барабана изменялась в пределах от  $0,1\omega_{кр}$  до  $0,2\omega_{кр}$ .

Угол наклона смесителя к горизонту принимался от  $0$  до  $5^\circ$ , что соответствует реальным условиям работы данного вида оборудования.

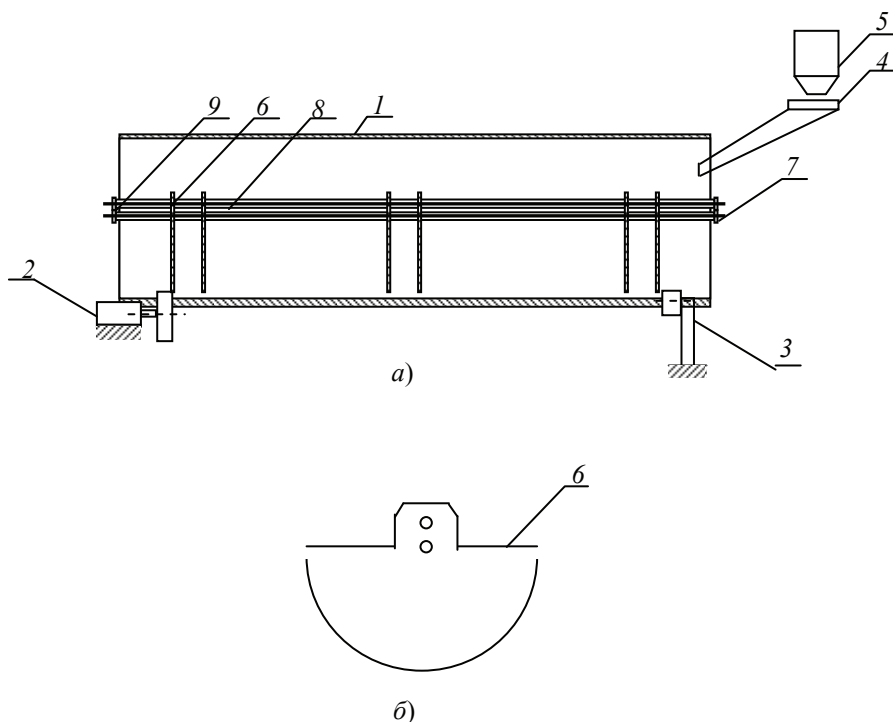
Коэффициент заполнения барабана сыпучим материалом достигал значения  $40\%$  от площади поперечного сечения на загрузочном краю барабана и постепенно уменьшался к его разгрузочному краю.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, *a*. Она включает в себя барабан 1 с изменяющимся углом наклона по отношению к горизонту от  $0$  до  $5^\circ$  и привод 2, позволяющий плавно изменять угловую скорость вращения в исследуемом диапазоне. Загрузочный край барабана опирается на опорный узел 3 и снабжен устройством для загрузки материала в смеситель в виде лотка 4. Производительность подачи материала изменяется за счет варьирования скорости подачи компонентов через питатель 5 в диапазоне от  $4$  до  $16 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для отбора проб с целью дальнейшего анализа характера распределения материала по длине барабана использовалась специальная конструкция пробоотборника, состоящая из пластин в виде полуокружностей 6, конфигурация которых показана на рис. 1, *б*, закрепленных на двух стержнях 7. При сборке этой конструкции между жесткими элементами размещались съемные втулки определенной длины 8 на оба стержня. Изменяя длину втулок и количество пластин, можно получать различную конфигурацию расположения пробоотборников.

Размеры втулок при проведении экспериментов выбирались таким образом, чтобы при проведении экспериментальных исследований имелась возможность осуществлять отбор проб в непосредственной близости к разгрузочному и загрузочному краям, а также в центре барабана. Причем расстояние между элементами этих трех пар пластин с помощью втулок одинаковой длины выбиралось равным. После сборки втулок и пластин эти элементы скреплялись между собой с помощью гаек 9, накрученных на резьбовых концах стержней. Таким образом получалась жесткая конструкция из пластин и втулок, одетых на стержни. Длины стержней выбирались несколько большими, чем длина барабана. Радиусы пластин, одетых на стержни, совпадали с внутренним радиусом смесительного барабана. Разборная конструкция пробоотборника позволяет с изменением длин и расположения опорных втулок определять характер распределения материала на любом участке барабана.

Отбор проб осуществлялся после выхода на установившийся режим работы смесителя. Время выхода изменялось для различных вариантов работы питателя от  $2$  минут  $30$  секунд до  $6$  минут. Считалось, что установившийся режим наступает, когда производительность смесителя становится равной производительности питателя, что определяется путем отбора проб на разгрузочном краю барабана за равные промежутки времени.



**Рис. 1** Схема экспериментальной установки

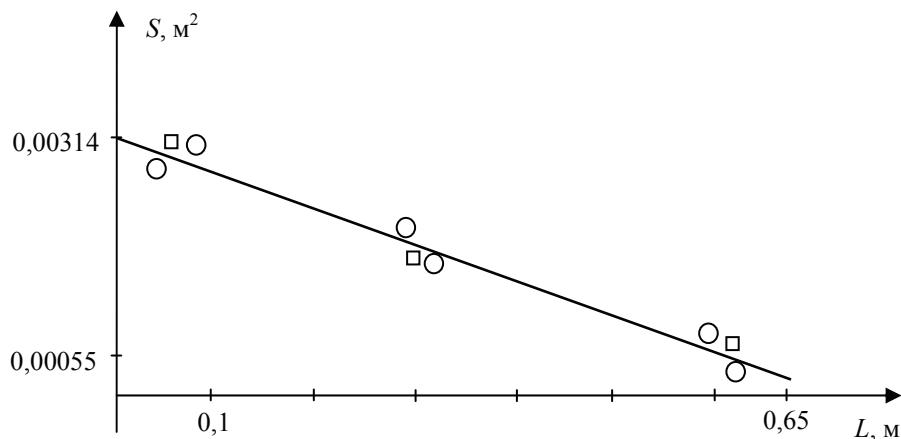
После остановки барабана исследовалось распределение вдоль его оси сыпучего материала двумя способами. Барабан экспериментальной установки был изготовлен из полупрозрачного материала (полипропилена), и при достаточной степени освещенности в лаборатории можно было измерять хорду, образованную компонентами в различных сечениях барабана при помощи штангенциркуля. Причем выбор места замера определялся дальнейшим использованием пробоотборника. При этом имелась возможность аналитического расчета объема каждой из этих проб. В результате использования пробоотборника определялся вес и объем каждой пробы, ограниченной пластинами.

В качестве исследуемых материалов использовались: кварцевый песок с диаметром частиц в диапазоне  $d = 0,2 \div 0,5$  мм, сернокислый калий с  $d = 0,5 \div 0,6$  мм, пшено  $d = 1 \div 1,5$  мм и гранулы полиэтилена с  $d = 3 \div 4$  мм.

Эксперименты с сернокислым калием и полиэтиленом проводились в качестве проверочных, а с кварцевым песком и пшеном проводились по несколько серий параллельных опытов при различных режимах работы барабана. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с использованием известной методики [8]. Воспроизводимость опытов оценивалась по критерию Кохрена.

Следует отметить, что при сравнении характера распределения компонентов вдоль оси барабана с линейной зависимостью более близкие значения были получены по результатам измерения хорды сыпучего материала и дальнейшего аналитического расчета. В этом случае разброс значений не превышал 5-7%. Это объясняется тем, что при подобного рода измерениях отсутствует воздействие на объект исследования. В случае использования пробоотборника возможны определенные ошибки, связанные с фазой введения устройства в слой материала и дальнейшей его выгрузкой. Однако использование пробоотборника подтверждает линейный характер распределения материала, хотя разброс значений оказывается несколько большим.

На рис. 2 показан линейный характер распределения кварцевого песка вдоль оси барабана по длине  $L$  при угловой скорости его вращения  $0,1\omega_{кр}$  и производительности питателя  $4 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$  после выхода экспериментальной установки на режим (сплошная линия). На рисунке  $\circ$  обозначены экспериментальные значения, полученные при измерениях хорды сыпучего материала и дальнейшего аналитического расчета площадей, занятых материалом в различных сечениях барабана. Экспериментальные значения, полученные с применением пробоотборника обозначены  $\square$ .



**Рис. 2** График распределения сыпучего материала вдоль оси барабанного смесителя

Как видно из рисунка, разброс экспериментальных значений невелик и не превышает 7% для измерений по хорде и 9-11% для экспериментальных данных, полученных с применением пробоотборника. Анализ результатов экспериментов показывает, что несмотря на достаточно большой разброс экспериментальных данных, не обнаружено закономерностей, указывающих на отклонение распределения сыпучего материала по длине барабана от линейного.

Таким образом, в этой серии экспериментов с использованием пробоотборника размеры ячеек выбирались одинаковыми и анализировался характер распределения сыпучего материала по длине барабана. После того как удалось убедиться в линейном характере распределения материала, с использованием математической модели процесса рассчитывались длины участков в начале, середине и в непосредственной близости от конца барабана с тем, чтобы объемы материала на этих участках были равными. При этом длины участков при движении к концу барабана увеличивались. Конструкция пробоотборника позволяет изменять длину участков варьированием длины распорных втулок. При проведении экспериментов длина участков пробоотборника подбиралась равной рассчитанным значениям, а также производилось измерение хорд и аналитически рассчитывались объемы материала в указанных участках по длине барабана.

Статистическая обработка большого числа проведенных опытов показала, что рассчитанные по модели и полученные в результате экспериментов объемы в различных частях барабана были сопоставимы при различных длинах участков. Разброс экспериментальных значений вполне укладывался в погрешность измерения объемов двумя указанными способами и не превышал 7-12 %.

По результатам проведенных экспериментов с различными сыпучими материалами можно сделать вывод о том, что в интересующем нас диапазоне работы барабанных смесителей характер распределения материала вдоль оси барабана близок к линейному. Таким образом, при разработке математической модели непрерывного процесса смешивания сделаны достаточно обоснованные допущения, позволяющие связывать объемы материала с длинами участков в различных сечениях барабана.

#### *Список литературы*

1. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.
2. J. Gyenis, Zs. Ulbert, J. Szepvolgyi and Diaz. Modeling of particle mixing and segregation processes // Abstract of Papers World Congress on Particle Technology 3, Brighton, UK, 1998.- P. 172.
3. Першин В. Ф. Моделирование процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана //Теоретические основы хим. технологии. - 1986. - Т. XX, № 4. - С. 508-513.
4. Мошинский А. И. Ячеечные модели при сложных структурах потоков в аппаратах // Теоретические основы хим. технологии. – 1992. – Т. XXVI, № 3. - С. 364-373.
5. Селиванов Ю. Т., Першин В. Ф. Моделирование процесса смешивания дисперсных материалов, отличающихся размерами частиц // Теоретические основы хим. технологии. – 2001. – Т. 35, № 1. - С. 90-93.
6. Макевнин М.П. Исследование движения сыпучих материалов во вращающихся барабанах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1963. – 16 с.
7. Першин В. Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1990. - 167 с.
8. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.

---

### **Experimental Research of Movement Character of Grain Material along the Rotary Drum Mixer Axis**

**V.F. Pershin, Yu.T. Selivanov, A.V. Orlov**

*Department "Applied Mechanics and Strength of Materials", TSTU*

**Key words and phrases:** rotary mixer, volume and sample weight; sampler.

**Abstract:** Questions connected with modeling of mixing process in drum mixer of continuous action are considered. The character of grain material distribution along the full length of the drum is investigated and analysed. According to the results of experimental research with various components it is stated that the distribution of material along the length of the drum under modeling process can be referred as linear.

---

### **Experimentelle Untersuchung des Charakters der Bewegung des Schüttstoffes entlang der Achse der Mischtrommel**

**Zusammenfassung:** Es sind die Fragen, die mit der Modellierung des Mischungsprozesses in der Mischtrommel der ununterbrochenen Wirkung betrachtet. Es ist der Charakter der Verteilung des Schüttstoffes entlang der Trommel untersucht und analysiert. Entsprechend der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit verschiedenen Komponenten wird die Schlussfolgerung darüber gezogen, daß man der

Charakter der Verteilung des Stoffes entlang der Trommel bei der Modellierung des Prozesses der ununterbrochenen Mischung als ein linearer betrachtet kann.

---

**Etude expérimentales du caractère du mouvement du matériel pulvérilent le long de l'axe du mélangeur à tambour**

**Résumé:** On examine les problèmes liés au modélage du processus du mélange dans le mélangeur à tambour. D'après les résultats des études expérimentales avec de différents composants on a conclu que pendant le modélage du processus continu du mélange le caractère de la répartition du matériel le long du tambour peut être pris pour linéaire.

---