

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ СЕГРЕГИРОВАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПОТОКАМИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Карев, В.Н. Долгунин

*Кафедра «Технологическое оборудование и пищевые технологии»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»; topt@topt.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором С.И. Дворецким

Ключевые слова и фразы: время пребывания; моделирование; смешение; управляемый сегрегированный поток.

Аннотация: Установлено, что для материалов с высокой склонностью к сегрегации эффективность смешения существенно возрастает, если процесс приготовления смеси организуется в две стадии: на первой стадии под действием продольных знакопеременных импульсов, и при использовании поперечных знакопеременных импульсов – на второй.

Приведены результаты экспериментального исследования и математического моделирования, позволяющие объяснить и прогнозировать различный вид функций распределения неоднородных по размеру частиц по времени пребывания в барабанном аппарате с управлением и без управления сегрегированными потоками.

В условиях предприятий малого и среднего бизнеса, занимающихся производством и переработкой зернистых материалов, важное значение приобретает возможность использования многофункционального технологического оборудования. В таких условиях многофункциональность оборудования обеспечивает снижение капитальных и эксплуатационных затрат при организации производства, в том числе и за счет рационального совмещения технологических процессов.

Барабанные аппараты широко используются в промышленности при переработке сыпучих материалов. В зависимости от конструкции внутренних устройств барабана такие аппараты применяются для организации тепломассообменных (сушки, обжига, гранулирования и др.) и гидромеханических (смешения, классификации и др.) процессов. Перемещение сыпучих материалов в такого рода аппаратах, вне зависимости от того снабжен ли барабан насадочным устройством или имеет гладкую внутреннюю поверхность, сопровождается образованием сегрегированных потоков, неоднородные частицы которых движутся в различных гидродинамических режимах, доминируют в определенных частях рабочего объема и, как следствие, имеют различное время пребывания.

С одной стороны, такие особенности технологического потока в рабочем объеме аппарата могут быть причиной негативных последствий (неоднородности качества, низкого выхода и т.д.). В связи с этим задача управления временем пребывания неоднородных частиц в рабочем объеме тепломассообменного аппарата является достаточно важной технологической задачей [1]. С другой стороны, с учетом результатов исследований [2], наличие сегрегированных потоков в рабочей зоне аппарата открывает перспективу для расширения его функциональных возможностей и организации совмещенных тепломассообменных и гидромехани-

ческих процессов за счет управления названными потоками. В барабанном аппарате с подъемными лопастями сегрегированные потоки материала зарождаются в быстром гравитационном потоке частиц скатывающегося слоя засыпки материала в нижней части барабана. Вследствие этого имеет место неоднородное распределение компонентов смеси на лопасти при ее заполнении материалом засыпки и наблюдается преимущественное сыпание с лопастей одних компонентов в подъемной, а других – в опускной частях барабана.

В работах [2, 3] установлена принципиальная возможность организации процессов разделения, смешения и обработки зернистых материалов с дифференциацией времени обработки неоднородных частиц в барабанном теплообменном аппарате за счет управления сегрегированными потоками материала в падающем слое частиц завесы, образуемой подъемными лопастями барабана. Управление сегрегированными потоками осуществлялось путем изменения величины и направления продольно ориентированных импульсов, воздействующих на частицы падающего слоя в подъемной и опускной частях барабана.

Перемешивание неоднородных частиц путем воздействия на падающий слой частиц продольными знакопеременными импульсами приводит к выравниванию концентрации вдоль оси барабана, что позволяет компенсировать неоднородность, возникающую вследствие погрешности дозирования компонентов смеси и различной динамики их движения в рабочем объеме аппарата. Однако в общем случае задача перемешивания материала в барабане может иметь более абстрактную постановку. В частности, барабанные насадочные аппараты широко используются для сушки и термовлажностной обработки зернистых материалов. При этом необходимым условием высокого качества обработки материалов в таком аппарате является однородность распределения неоднородных частиц материала в падающем слое частиц. Это объясняется тем, что в падающем слое наиболее интенсивно протекают теплообменные процессы. Вследствие эффектов сегрегации распределение неоднородных частиц в падающем слое не соответствует таковому для смеси, поскольку даже при условии однородной концентрации вдоль барабана сегрегированные потоки в его поперечном сечении сохраняются.

В связи с изложенным, возникает идея воздействия на сегрегированные потоки частиц в аппарате поперечными знакопеременными импульсами с целью подавления эффектов сегрегации в поперечном сечении барабана и обеспечения более однородного распределения компонентов смеси в объеме аппарата. Очевидно, что для обеспечения максимальной эффективности объемного перемешивания необходимо найти рациональный вариант сопряжения продольных и поперечных импульсов, воздействующих на поток материала в аппарате.

Целесообразность такого подхода в организации процесса объемного смешения материала в барабанном аппарате подтверждена экспериментально. С этой целью проведено исследование динамики объемного смешения в барабанном аппарате с насадкой, управляющей сегрегированными потоками при трех вариантах организации процесса с использованием знакопеременных импульсов:

- 1) продольных;
- 2) поперечных;
- 3) комплексно продольных и поперечных.

Исследование проведено с использованием экспериментальной установки [3] с вращающимся барабаном диаметром 0,3 м и длиной 1,2 м. На внутренней поверхности барабана закреплены подъемные Г-образные лопасти, а в его центральной части размещена насадка, управляющая сегрегированными потоками, выполненная в виде двух рядов воронок с наклонными течками. Течки закреплены на воронках с возможностью поворота вокруг их вертикальной оси. За счет поворота течек воронок, расположенных в подъемной и опускной частях барабана, достигается изменение величины и направления импульсов, сообщаемых сегрегированным потокам падающих частиц.

Исследование проведено в периодическом режиме смешения с оценкой динамики изменения коэффициента объемной неоднородности смеси в барабане по следующей методике. Компоненты бинарной смеси загружают в барабан, размещая их последовательно вдоль его оси. При этом учитывают, что при любых условиях аппарат должен сохранять свою базовую функцию теплообменного аппарата, для чего необходимо обеспечивать условие достаточного его заполнения на всей длине барабана.

Периодически процесс смешения прерывают с целью оценки коэффициента неоднородности (вариации) распределения компонентов смеси в объеме аппарата. Для определения величины коэффициента неоднородности отбирают пробы материала с использованием пробоотборников, представляющих собой короба, равные по длине рабочей части барабана и разделенные поперечными перегородками на секции. Число секций в коробах соответствует числу отклоняющих элементов управляющей насадки в каждом из ее рядов. Два пробоотборных короба используют для сбора частиц, падающих в подъемной и опускной частях барабана соответственно, и еще один короб применяют для исчерпывания частиц из засыпки материала в нижней части барабана.

Секции пробоотборников заполняют материалом при повороте барабана вручную на угол, не превышающий угла засыпки материала, и определяют содержание целевого компонента в каждой секции весовым методом. После анализа материал возвращают в соответствующие секции пробоотборников и выгружают в барабан. Такая процедура отбора проб позволяет отразить общую картину процесса образования смеси при внесении минимальных возмущений в динамику смешения. Коэффициент неоднородности вычисляют традиционным способом как выраженное в процентах отношение среднего квадратичного отклонения концентрации к ее среднему значению.

В качестве модельной зернистой среды использована смесь гранул полиэтилена (фракция +4,0–5,0) и стеклянного бисера (фракция +3,0–3,5). Такое сочетание размеров и плотностей частиц чрезвычайно усиливает их склонность к сегрегации и осложняет процесс приготовления смеси.

Варианты продольного, поперечного и смешанного воздействий импульсами на частицы падающего слоя при смешении организовывались с использованием схем ориентации отклоняющих элементов, представленных на рис. 1.

Результаты исследования, представленные на рис. 2, свидетельствуют, что на начальном этапе процесса наиболее интенсивное смешение протекает при использовании схемы управления продольно уравновешенными импульсами (кривая 2). Однако с течением времени при такой схеме организации процесса начинают доминировать эффекты сегрегации, приводящие к повышению неоднородности распределения компонентов смеси.

При организации процесса по схеме с поперечно ориентированными импульсами (кривая 1 на рис. 2) смешение на начальном этапе протекает менее

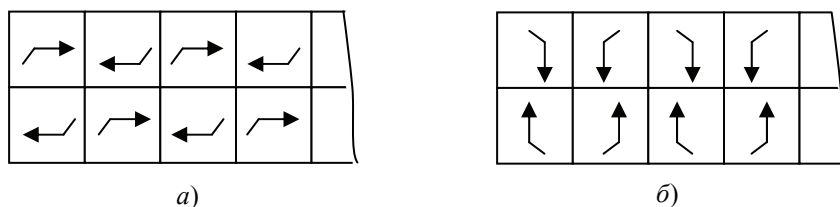


Рис. 1. Схемы ориентации отклоняющих элементов насадки, управляющей сегрегированными потоками, с продольно (а) и поперечно (б) уравновешенными знакопеременными импульсами

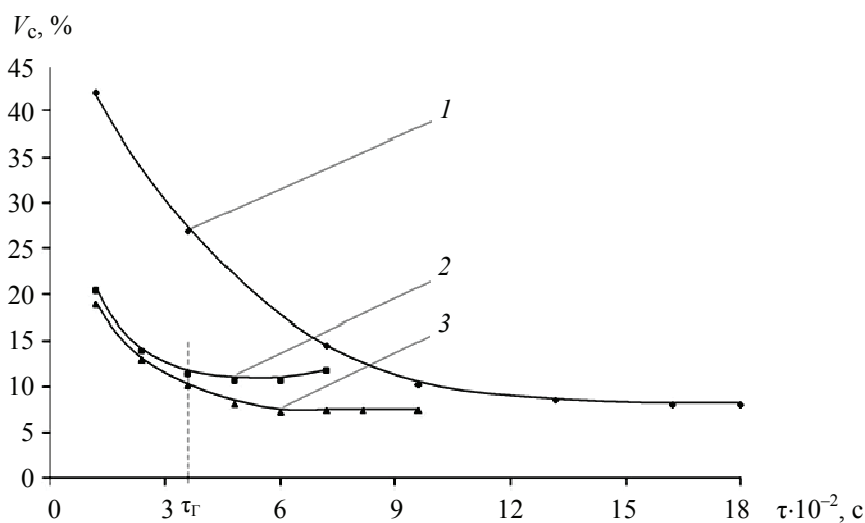


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента вариации в объеме смеси V_c при смешении поперечно (1) и продольно (2) уравновешенными встречными импульсами и при комплексном использовании продольно ($\tau < \tau_G$) и поперечно ($\tau > \tau_G$) уравновешенных импульсов (3)

интенсивно. Однако на завершающем этапе процесса, вследствие подавления эффектов сегрегации в поперечном сечении барабана, достигается более высокая однородность смеси и наблюдается образование плато в распределении концентрации при относительно стабильном значении объемного коэффициента вариации.

Наблюдаемые особенности организации процесса в соответствии со схемами управления сегрегированными потоками, представленными на рис. 1, приводят к идеи их рационального совмещения, а именно: к использованию продольно ориентированных импульсов на первом этапе организации процесса и поперечно ориентированных импульсов – на завершающей его стадии. При этом, переход с этапа обработки материала продольными импульсами на его обработку поперечными импульсами целесообразно осуществлять в момент времени, когда скорость протекания процесса при последнем варианте его организации начинает превышать таковую в соответствии с первым вариантом.

Результаты исследования (см. рис. 2) свидетельствуют, что при двухстадийной организации процесса (кривая 3) достигается более высокая однородность объемного распределения компонентов в аппарате при высокой интенсивности смешения и стабильности достигнутого качества смеси. При этом коэффициент вариации на 38 % ниже, чем при использовании схемы смешения продольно ориентированными импульсами (кривая 2), а равновесная концентрация достигается в два раза быстрее по сравнению со схемой смешения поперечно ориентированными импульсами (кривая 1). Очевидно, что при организации процесса смешения в непрерывном режиме длина участков барабана с воздействием на материал продольными и поперечными знакопеременными импульсами, должна определяться из условия обеспечения необходимого времени обработки материала на соответствующем этапе.

Возможность управления временем обработки неоднородных частиц путем управления сегрегированными потоками в барабанном аппарате принципиально установлена ранее методом импульсного ввода индикатора, но с той лишь разницей, что в качестве индикатора использовано вещество, образующее в сочетании

с веществом технологического потока в аппарате смесь с высокой склонностью к сегрегации.

Однако такой подход может быть использован только для иллюстрации принципиальной возможности управления временем пребывания неоднородных частиц в аппарате, поскольку не позволяет проанализировать влияние различных вариантов управления на структуру потока по каждому из компонентов реальной смеси. В связи с этим в настоящей работе проведено комплексное исследование объекта, включающее методы математического и физического моделирования, последний из которых базировался на классическом экспериментальном методе индикатора. С целью снижения погрешности и повышения результативности эксперимента осуществлялся одновременный (параллельный) импульсный ввод индикаторов в технологический поток по каждому из компонентов смеси.

При исследовании управления временем пребывания неоднородных частиц в рабочем объеме барабанного насадочного аппарата в качестве модельного материала использовался гранулированный аммофос товарной фракции +1,2–4,0 мм. В качестве индикатора выбраны фракции +1,2–2,0 и +3,0–4,0 мм, имеющие гранулометрический состав, аналогичный таковому для соответствующих фракций модельного материала, но отличающиеся от них по цвету. Масса дозы индикаторов составляла 0,025 и 0,1 кг для мелкой и крупной фракций соответственно.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. После загрузки барабана и выхода установки на стационарный режим одновременно с вводом доз индикаторов начинался непрерывный отбор проб материала на выходе из барабана, объем которых формировался полным потоком в течение каждых 15 с. Пробы анализировались на содержание в них частиц индикаторов (концентрации C) весовым методом после выделения последних из проб визуальным методом.

С целью сравнительной оценки эффективности устройства для управления временем пребывания неоднородных частиц в работе проведено исследование распределения времени пребывания частиц сегрегирующего индикатора в барабанном насадочном аппарате традиционной конструкции в отсутствие предлагаемого устройства, то есть при нулевой величине избыточного импульса, воздействующего на сегрегированные потоки.

Результаты исследований, представленные на рис. 3, *a*, свидетельствуют о существенном различии характеристик распределения времени пребывания частиц контрольных фракций в аппарате.

Более высокие значения среднего времени и времени дисперсии для частиц крупной фракции гипотетически объясняются задерживающей функцией лопастей подъемной насадки. Эта функция в наибольшей степени проявляет себя в отношении крупных частиц, поскольку именно они наиболее интенсивно исчерпываются лопастями с поверхности засыпки и возвращаются в нее с наибольшей задержкой по времени.

С целью подтверждения этой гипотезы проведено математическое моделирование динамики перемещения импульсно вводимых доз индикаторов в аппарате с учетом различных значений времени задержки и интенсивности исчерпывания для частиц крупной и мелкой фракций. Интенсивность исчерпывания определялась экспериментально и учитывалась с использованием коэффициента исчерпывания, равного отношению концентрации частиц контрольного компонента на лопасти к их средней концентрации в засыпке. Для частиц крупной и мелкой фракций величина коэффициента исчерпывания составила соответственно 1,4 и 0,85. Время задержки частиц вычислялось как среднее время пребывания частиц на лопастях с учетом скорости вращения барабана.

Математическое моделирование проведено на базе математической модели процессов перемешивания и сепарации в аппарате с управляемыми сегрегированными потоками материала [3], которая была адаптирована здесь для решения специфической задачи.

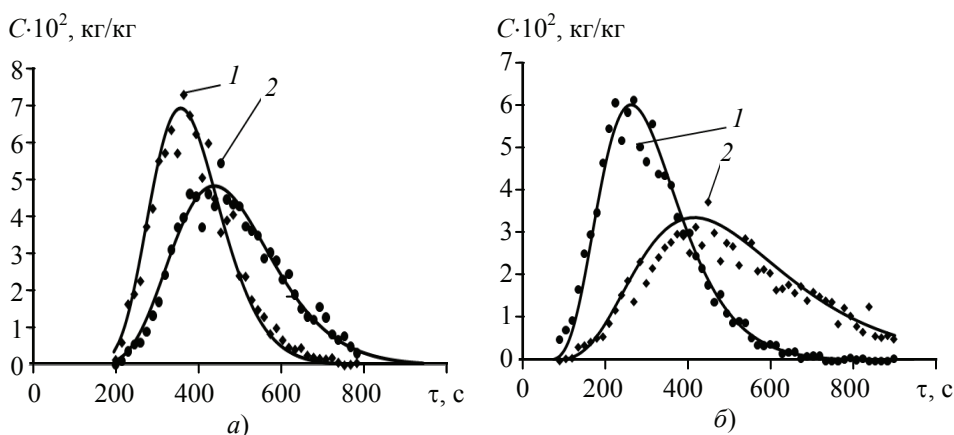


Рис. 3. Распределение частиц мелкой (1) и крупной (2) фракций по времени пребывания τ в аппарате без управления (а) и с управлением (б): точки – эксперимент; линии – расчет

Адаптация заключалась в замене способа выражения кинетической характеристики, определяющей склонность контрольного компонента зернистого материала к сегрегированию, с коэффициента разделения на коэффициент истощивания, а также соответствующего изменения начальных условий задачи, обусловленного наличием импульса концентрации компонента на входном участке аппарата.

Результаты моделирования, представленные на рис. 3, а, свидетельствуют об адекватности экспериментальных и расчетных распределений. Это позволяет сделать вывод о правомерности принятой гипотезы формирования структуры потоков компонентов смеси в аппарате и дает возможность использовать полученные их характеристики при моделировании различных вариантов управления сегрегированными потоками.

Поскольку суммарное содержание фракций контрольных компонентов составляет всего 45 % от массы смеси, моделирование распределения частиц индикатора осуществлялось параллельно в автономном режиме по каждому компоненту. Это стало возможным благодаря использованию кинетических характеристик в виде коэффициентов истощивания, позволяющих отразить склонность к сегрегированию сколь угодно большого числа контрольных компонентов.

При исследовании технологических возможностей предлагаемого способа и устройства учитывались два основных технологических аспекта управления сегрегированными потоками в теплообменном аппарате: 1) обеспечение однородности обработки контрольных фракций материала в процессах сушки и термовлажностной обработки; 2) обеспечение условий для повышения однородности гранул в процессе гранулообразования. Очевидно, что в соответствии с первым аспектом необходимо уменьшить, а в соответствии со вторым – наоборот, увеличить время обработки мелкой фракции по сравнению со временем обработки крупной фракции.

Для достижения необходимого эффекта дифференциации времени пребывания компонентов течи отклоняющих элементов, выполненных в виде воронок, ориентировались таким образом, чтобы сообщить дополнительный избыточный импульс в направлении выгрузки той части сегрегированного потока, частицы которой должны перемещаться с меньшим временем пребывания. В результате, время пребывания варьировалось путем изменения величины названного импульса.

Кроме того, в работе проведено исследование возможности оказания дополнительных эффектов управления временем обработки неоднородных частиц путем

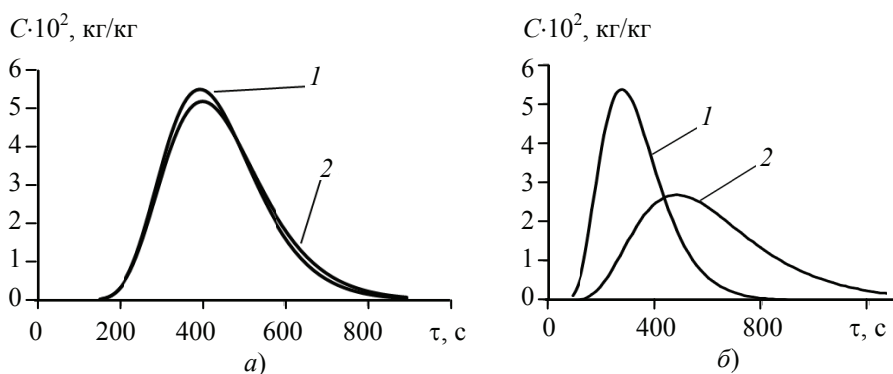


Рис. 4. Результаты математического моделирования функций распределения частиц мелкой (1) и крупной (2) фракций во времени пребывания в аппарате с управлением сегрегированными потоками для вариантов:
а – выравнивание распределений; *б* – ускоренный вывод мелкой фракции

воздействия на сегрегированные потоки импульсами в направлении, обратном направлению технологического потока.

На рис. 3, *б* представлены результаты математического моделирования эффекта задержки мелкой фракции в аппарате в сравнении с соответствующими экспериментальными результатами. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует об их адекватности при среднем квадратичном отклонении, равном 6 %. Указанный эффект достигается путем ориентации течек отклоняющих элементов, расположенных в опускной части барабана, в направлении к его разгрузочному торцу, что соответствует 100%-й величине импульса, сообщаемого отклоняющими элементами частицам сегрегированного потока.

Сравнение результатов, представленных на рис. 3, *а* и 3, *б* позволяет предположить, что при некоторой, отличной от 100 %, величине продольного импульса возможно обеспечить тождественные характеристики структуры потока для крупной и мелкой фракций материала. На рис. 4, *а* представлены результаты компьютерной реализации варианта управления структурой сегрегированных потоков крупной и мелкой фракций компонентов, обеспечивающего выравнивание их среднего времени пребывания в аппарате. Указанный эффект достигается при величине импульса, действующего на частицы падающего слоя в опускной части барабана в направлении выгрузки, равной 4,5 % от максимальной.

Результаты моделирования варианта управления сегрегированными потоками, обеспечивающего задержку в аппарате крупной фракции, что актуально, например при сушке и термовлажностной обработке материала, представлены на рис. 4, *б*. Указанный вариант, позволяющий достигнуть двукратного уменьшения среднего времени пребывания мелкой фракции по отношению к таковому для крупной фракции, реализован путем неполной ориентации отклоняющих элементов подъемной части барабана в направлении его разгрузочного торца, в результате чего величина продольного импульса составляла около 55 % от максимально возможного.

Кроме того, экспериментально установлено и методом математического моделирования подтверждено, что использование импульсов, действующих на сегрегированные потоки в направлении, обратном направлению движения технологического потока, с целью дифференциации времени пребывания компонентов смеси, приводит к чрезвычайно высокому возрастанию дисперсии их распределений по времени.

Работа выполнена при поддержке фонда фундаментальных исследований РАН (грант № 09-08-97521).

Список литературы

1. Bates, L. User Guide to Segregation / Bates, L. – United Kingdom : British Materials Handling Board, Elsinore house, 1997. – 134 p.
2. Operating the Segregated Flows of Particulate Materials as a Principle of Technological Process Organization / V.N. Dolginun [and others] // 10th International Chemical and Biological Engineering Conference. – Braga, Portugal, 2008. – Full text of paper in CD.
2. Dolginun, V.N. The treatment of nonuniform granular materials by means of operating the segregated flows / V.N. Dolginun, O.O. Ivanov, A.A. Ukolov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 321–327.

The Development of Operation Principles for Segregated Technological Flows of Granular Materials

V.I. Karev, V.N. Dolginun

*Department «Technological Equipment and Food Technologies», TSTU;
topt@topt.tstu.ru*

Key words and phrases: controlled segregated flow; mixing; modeling; time distribution.

Abstract: It was found out, that the mixing efficiency essentially increases if the mixing process for materials with high inclination to segregation is realized in two stages: mixing by the longitudinal counteracting impulses in the first stage and mixing by the transversal counteracting impulses in the second stage.

The experimental research and mathematical modeling are carried out in order to explain and to forecast the difference between the time distribution functions of particulate solids differing in size in a drum apparatus with and without the segregated flow operation.

Entwicklung der Prinzipien der Steuerung von den segregierten technologischen Ströme der körnigen Stoffe

Zusammenfassung: Es ist festgestellt, daß die Effektivität des Mischens für die Stoffe mit der hohen Neigung zur Segregation wesentlich wächst, wenn das Prozess der Gemischfertigung in zwei Stadien organisiert wird: auf dem ersten Stadium unter Einwirkung der alternierenden Längsimpulsen und bei der Verwendung der alternierenden Querimpulsen auf dem zweiten Stadium.

Es sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung und der matematischen Modellierung angeführt. Sie erlauben, die verschiedene Form der Funktionen der Verteilung der ungleichen Teilchen nach der Zeit des Aufenthaltes im Trommelapparat mit der Steuerung und ohne Steuerung von den segregierten Strömen zu erklären und zu prognostizieren.

Développement des principes de la commande des flux technologiques de ségrégation des matériaux granulés

Résumé: Est établi que pour les matériaux à haute disposition pour une ségrégation l'efficacité du mélange augmente considérablement si le processus de la préparation du mélange est organisé en deux stades: au premier stade sous l'action des impulsions longitudinales alternatives et lors de l'application des impulsions longitudinales alternatives au deuxième stade.

Sont cités les résultats de l'étude expérimentale et du modélage mathématique permettant d'expliquer et de prévoir le différent type des fonctions de la distribution des particules hétérogènes par leur dimension par le temps de la présence dans l'appareil de tambour à commande et sans commande des flux de ségrégation.

Авторы: *Карев Владимир Иванович* – аспирант кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии»; *Долгушин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и пищевые технологии», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Гатапова Наталия Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».
