

РОМАНОВ Александр Андреевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
В АППАРАТЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ СЕПАРАЦИИ
ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПО ТЕХНОЛОГИИ "МУЛЬТИСЕГ"**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2002

Работа выполнена на кафедре "Технологическое оборудование и прогрессивные технологии" Тамбовского государственного технического университета.

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Долгунин Виктор Николаевич;
кандидат технических наук, доцент
Уколов Андрей Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гришаев Игорь Григорьевич;
доктор технических наук, профессор
Малыгин Евгений Николаевич

Ведущая организация: АО "ВИИТиН", г. Тамбов

Защита состоится " ____ " _____ 2002 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 Тамбовского государственного технического университета по адресу:
392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 60.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу:
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент

В. М. Нечаев

Подписано в печать 25.11.2002.
Гарнитура Times New Roman. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,4 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 733

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Актуальность работы. В настоящее время технология дисперсных материалов (Particle Technology) характеризуется как бурно развивающееся направление в науке и технике, которое имеет важное, постоянно возрастающее значение для пищевой, химической, металлургической и других отраслей промышленности.

Среди множества процессов технологии дисперсных материалов особое место занимает процесс сепарации, широко используемый на различных стадиях производства от подготовки сырья до завершающих операций по обеспечению требуемого качества продукта. Традиционными задачами сепарации являются разделение частиц материала по размеру, плотности, форме, шероховатости или другим свойствам.

Как показывает практика, в различных отраслях промышленности существует проблема сепарации частиц зернистых материалов, различающихся по комплексу свойств, как правило, по размеру и плотности, размеру и шероховатости и т.п. Разделение таких смесей традиционно связано с необходимостью последовательного применения ситовой и пневмо- или гидравлической сепарации, что предполагает использование вспомогательных потоков газа или жидкости, мощных источников вибрации и приводит к загрязнению окружающей среды выбросами запыленного воздуха, сточными водами, мощным шумоизлучением, ухудшению условий труда на соответствующих предприятиях.

В конце 80-х годов на кафедре ТО и ПТ ТГТУ была разработана технология многоступенчатой сепарации "Мультисег", во многом лишенная указанных недостатков, а также оборудование, ее реализующее. В соответствии с технологией "Мультисег" разделение неоднородных частиц осуществляется с использованием эффектов сегрегации и миграции в быстром сдвиговом потоке зернистой среды. Механизмы процесса позволяют сепарировать частицы по комплексу физико-механических свойств без использования сит и вспомогательных потоков газа или жидкости.

Традиционные аппараты "Мультисег" представляют собой барабан с подъемно-лопастной насадкой, сепарирующим шероховатым скатом и блоком отклоняющих элементов для многоступенчатого разделения потоков фракций и транспортирования их к противоположному торцам барабана. Однако, несмотря на внешнюю простоту таких аппаратов до настоящего времени задача их проектирования решалась на основе накопленного экспертного опыта. Это объясняется тем, что проектирование такого объекта является сложной оптимизационной задачей, решению которой препятствует недостаточная изученность взаимосвязи между его конструктивными и технологическими параметрами.

Одним из препятствий для адекватного учета названной взаимосвязи является отсутствие достаточно надежного и доступного инженерного метода прогнозирования распределения зернистого материала по длине аппарата.

В настоящей работе проведены исследования, направленные на развитие математической модели аппарата "Мультисег" и поиск решения задачи оптимального проектирования сепаратора "Мультисег" традиционной конструкции.

Работа выполнена в соответствии с единым заказ-нарядом Министерства образования РФ МНТП (шифр П.Т. 465, П.Т. 419) и включена в Государственную программу "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий" по разделу "Высокие технологии межотраслевого применения" на 2000 г.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена решению задачи оптимального проектирования сепаратора "Мультисег" традиционной конструкции и разработке соответствующей математической модели процесса. В соответствии с этим в задачу данной работы входило:

1 Разработать инженерный метод прогнозирования распределения зернистого материала по длине вращающегося барабана в зависимости от физико-механических свойств среды и основных конструктивных и режимных параметров барабанного аппарата.

2 С использованием разработанного метода провести уточнение математической модели гравитационного сепаратора "Мультисег", учитывающую изменение коэффициента его заполнения по ступеням сепарации.

3 Разработать инженерную методику определения оптимальных конструктивных и технологических параметров гравитационного сепаратора "Мультисег".

Научная новизна. Разработана математическая модель формирования потока зернистой среды во вращающемся барабане при малой скорости вращения ($Fg < 0,1$), позволяющая прогнозировать изменение коэффициента заполнения по его длине в зависимости от свойств материала, конструктивных и технологических параметров аппарата.

Разработана усовершенствованная математическая модель многоступенчатой сепарации зернистых материалов в аппарате "Мультисег", учитывающая влияние неоднородности распределения материала в аппарате на технико-экономические показатели процесса разделения.

Сформулирована и решена задача оптимизации конструктивных и технологических параметров барабанного сепаратора зернистых материалов "Мультисег", позволяющая на основе данных об исходной смеси и требуемом качестве готового продукта находить конструктивные и технологические параметры сепаратора, обеспечивающие минимум приведенных затрат на проведение процесса.

Практическая ценность. Предложен инженерный метод прогнозирования распределения зернистого материала в непрерывнодействующем аппарате с вращающимся барабаном в зависимости от физико-механических свойств среды, технологических и конструктивных параметров барабана.

На основе оптимизационного алгоритма предложена методика расчета оптимальных конструктивных и технологических параметров сепаратора "Мультисег". Разработано программное обеспечение для решения указанной оптимизационной задачи на ПЭВМ.

С использованием разработанной методики определены оптимальные конструктивные и технологические параметры сепаратора "Мультисег" для разделения зерновой смеси пшеница-рожь, обеспечивающие снижение приведенных затрат на производство на 23 % и разработаны рекомендации по модернизации соответствующих промышленных сепараторов зерна, позволяющие повысить производительность на 15 % и снизить энергозатраты на 36 %.

Результаты работы в виде рекомендаций по модернизации конструкции барабанного сепаратора "Мультисег" используются в СПК "Новый Мир" Моршанского района Тамбовской области.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на 21-м международном конгрессе по переработке минералов (Рим, Италия, 2000 г.), международной конференции по переработке сыпучих материалов HUN-PRA-PARTEC (Будапешт, Венгрия, 2001 г.), на ежегодных научно-практических конференциях Тамбовского государственного технического университета в 1999 – 2002 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано четыре работы.

Объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений. Она содержит 115 страниц основного текста, 27 рисунков, 3 таблицы и список использованных источников из 113 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко рассмотрено содержание работы, показана актуальность решаемых в ней задач.

В **первой главе** проведен анализ традиционных процессов сепарации зернистых материалов, частицы которых различаются по комплексу физико-механических свойств.

Показано, что эти процессы являются многостадийными и многопоточными, требуют значительных капитальных и эксплуатационных затрат и предполагают использование вспомогательных потоков жидкости или газа, являющихся источниками загрязнения окружающей среды. Отмечается, что технология "Мультисег" сепарации полидисперсных материалов, состоящих из частиц различной плотности (шероховатости, упругости), лишена указанных недостатков, однако широкому внедрению этой технологии препятствует отсутствие метода оптимального проектирования соответствующих аппаратов.

Кроме того, предложенная ранее математическая модель сепарации с противотоком неоднородных частиц (технологии "Мультисег") характеризуется существенным недостатком, заключающимся в отсутствии учета взаимосвязанного влияния расхода материала, его свойств и важнейших конструктивных и технологических параметров барабанного сепаратора на изменение коэффициента заполнения по его длине и, как следствие, на эффективность сепарации и работоспособность аппарата.

Также проведен анализ работ, посвященных исследованию динамики движения зернистой среды во вращающемся барабане. Результаты этого анализа свидетельствуют об отсутствии достаточно надежного и доступного для инженерной практики метода прогнозирования

коэффициента заполнения как функции координаты по длине барабана в зависимости от физико-механических свойств материала, основных конструктивных параметров аппарата и режимных характеристик его эксплуатации.

Первая глава завершается формулировкой задач исследования.

Вторая глава посвящена исследованию влияния коэффициента заполнения барабана материалом на эффективность сепарации в аппаратах "Мультисег". Сепаратор "Мультисег" традиционной конструкции представляет собой аппарат с вращающимся барабаном, имеющим периферийную подъемно-лопастную насадку (рис. 1), обеспечивающую равномерную подачу материала на разделительную пластину по всей длине барабана. Под нижней кромкой пластины расположены три ряда отклоняющих элементов, реализующих принцип многоступенчатой сепарации. Три соседних элемента, расположенных в смежных рядах блока отклоняющих элементов, и соответствующий им участок барабанного аппарата с сепарирующим скатом образуют одну ступень сепарации.

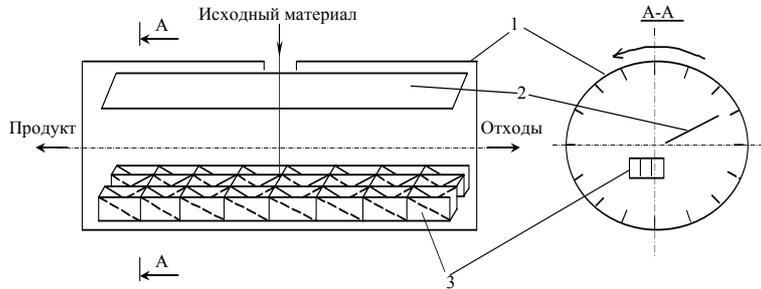


Рис. 1 Схема аппарата "Мультисег":
1 – барабан с подъемно-лопастной насадкой; 2 – шероховатая пластина;
3 – блок отклоняющих элементов

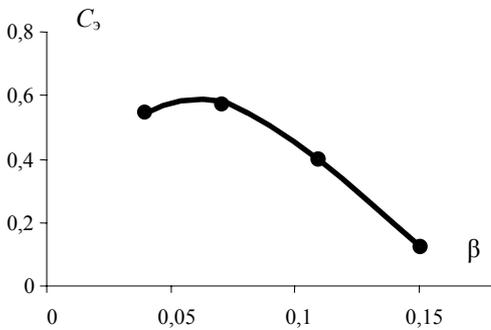


Рис. 2 Зависимость эффективности сепарации от коэффициента заполнения барабана

высотой подпорного кольца и принимался постоянным по длине барабана. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Зависимость, представленная на рис. 2, позволяет сделать вывод о весьма существенном влиянии коэффициента заполнения на эффективность сепарации. Снижение выхода продукта с увеличением коэффициента заполнения в барабане может быть объяснено возрастанием интенсивности продольного перемешивания в засыпке материала и снижением относительной интенсивности исчерпывания материала на разделении в гравитационном потоке на сепарирующем скате. Кроме того, изменение коэффициента заполнения становится причиной изменения расстояния между засыпкой материала в барабане и сепарирующей насадкой. Вследствие этого соответствующим образом изменяется величина смещения встречных потоков частиц сепарированного материала под действием блока отклоняющих элементов.

Необходимым условием продольного транспортирования материала в барабанных аппаратах является существенное изменение коэффициента заполнения вдоль оси барабана. В связи с отсутствием общепризнанной теории, адекватно описывающей гравитационное течение сыпучего материала в широком диапазоне скоростей сдвига, а также доступных и надежных методов расчета коэффициента заполнения в зависимости от физико-механических свойств материала, его расхода, геометрических параметров барабана и скорости его вращения, при разработке соответствующего метода расчета ограничимся случаем движения материала в стационарном режиме, когда геометрия поверхности и внутренняя структура движущегося материала не изменяются во времени. В общем случае поверхность неподвижного слоя частиц, являющаяся основанием для скатывающегося слоя, имеет достаточно сложную форму, которая зависит от диаметра, скорости вращения и коэффициента заполнения барабана, а также от степени связности частиц материала. Как показывает опыт, для несвязных зернистых сред при малых скоростях вращения барабана, удовлетворяющих условию $Fg \leq 0,1$, поверхность скатывания близка к плоскости, и центр циркуляции материала в засыпке имеет симметричное расположение. При таком условии средние статистические траектории движения частиц в засыпке будут симметричными и могут характеризоваться исключительно их радиальной координатой в поперечном сечении барабана. Проанализируем движение материала в засыпке при следующих допущениях, соответствующих условию $Fg \leq 0,1$: все частицы скатывающегося слоя в некотором произвольном сечении движутся по параллельным траекториям; угол крутого спуска плоскости ската равен углу естественного откоса материала.

В этом случае при отсутствии продольного потока материала в барабане поверхность ската является плоскостью, параллельной оси барабана. Линии крутого спуска располагаются в соответствующих плоскостях поперечного сечения барабана, перпендикулярных его оси, а частицы, скатывающиеся вдоль этих линий, не имеют продольной составляющей скорости. Очевидно, что коэффициент заполнения барабана материалом в этом случае одинаков по его длине. Для возникновения продольного потока среды в некотором произвольном сечении барабана у вектора скорости скатывающихся частиц должна появиться продольная составляющая. Необходимым условием возникновения такой составляющей является образование склона плоскости ската (линий крутого спуска) по отношению к плоскости поперечного сечения. Вследствие склона плоскости ската линии наиболее крутого спуска уже не будут располагаться в выше обозначенных плоскостях поперечного сечения барабана, а векторы скорости скатывающихся частиц приобретут продольную составляющую, направленную к разгрузочному торцу аппарата.

Из сказанного следует очевидный вывод о наличии существенной взаимосвязи между величиной потока и углом наклона поверхности ската, с одной стороны, и между величиной потока и темпом изменения коэффициента заполнения по длине барабана, с другой. Определение такой взаимосвязи позволит прогнозировать изменение коэффициента заполнения по длине барабана при различных конструктивных и режимных параметрах барабанного аппарата.

Для определения названных взаимосвязей проанализируем движение зернистой среды на некотором произвольном участке барабана, схематически представленном на рис. 3. Предположим, что в произвольном сечении барабана имеет место поток зернистой среды, равный j_z .

Коэффициент заполнения барабана в этом сечении известен и равен $\beta(z_1)$. Барабан установлен горизонтально и вращается с угловой скоростью ω . В соответствии с движением зернистой среды в барабане, скатывающегося слоя засыпки, крутого спуска AB и CD на себя поверхность плотного слоя вращающейся обечайки тельное движение вокруг оси скатываются по ней в линии крутого спуска z_1 , будут располагаться под поперечного сечения. Причем пропорциональна величине увеличением угла склонения засыпки, который проходит угла склонения плоскости ската которая питает поток частиц, Положение названной зоны в определить, основываясь на скатывающегося слоя при малых частью плоскости ската, которая соответствующего поперечного

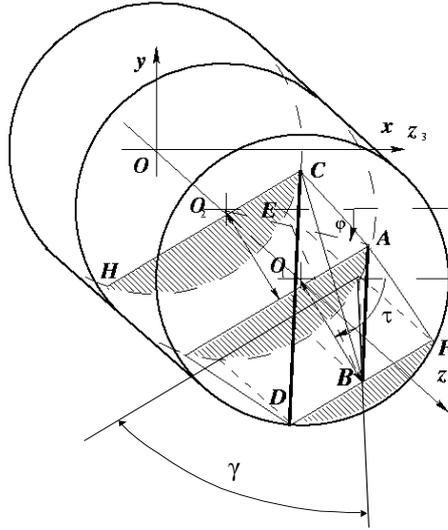


Рис. 3 Схема движения зернистой среды

(CF). Замыкающая ограничительная линия (BC) определяется как линия, проходящая через точку симметрии B поверхности ската в поперечном сечении с одной стороны и точку C пересечения линии крутого спуска DC с поверхностью барабана. При этом линия крутого спуска DC определяет периферийную траекторию частиц, которые при скатывании достигают сечения z_1 барабана. Определив зону, питающую поток частиц, проходящих через поперечное сечение z_1 , можно рассчитать продольный поток материала по формуле:

$$I_z = \int_{R_z}^{R_b} \sqrt{\frac{R^2 - R_z^2}{R_b^2 - R_z^2}} \Delta z \omega \rho dR = 0,5 \Delta z \omega \rho \left(R_b + \frac{R_z^2}{\sqrt{R_b^2 - R_z^2}} \ln \left(\frac{R_b + \sqrt{R_b^2 - R_z^2}}{R_b - \sqrt{R_b^2 - R_z^2}} \right) \right), \quad (1)$$

где R_b – радиус барабана; R_z – расстояние от оси барабана до поверхности неподвижной части засыпки, которое может быть определено как разность между радиусом барабана и высотой сегмента плотного слоя засыпки, т.е. $R_z = R - h_z$, $\Delta z = |z_1 - z_3|$.

С другой стороны, зона BCF определяет сечение (BEF) в поднимающемся слое частиц, в котором имеет место поток частиц, равный по величине потоку материала в барабане, т.е.:

$$j_z = I_z. \quad (2)$$

Поскольку в стационарном режиме j_z есть величина постоянная, равная производительности аппарата, то из последнего уравнения находим:

$$\Delta z = \frac{j_z}{0,5 \omega \rho \left(R_b + \frac{R_z^2}{\sqrt{R_b^2 - R_z^2}} \ln \left(\frac{R_b + \sqrt{R_b^2 - R_z^2}}{R_b - \sqrt{R_b^2 - R_z^2}} \right) \right)}. \quad (3)$$

Из сказанного выше следует, что точка B является точкой касания отрезка DF и конусной поверхности с вертикальной осью, вершина которого находится в точке A , а угол при вершине равен удвоенному углу естественного откоса материала 2α . При этом точка B является серединой хорды DF и, следовательно, является точкой касания конусной поверхности с окружностью радиуса R_z , лежащей в поперечном сечении z_1 и имеющей центр в точке O_1 . Пользуясь этим обстоятельством и зная расстояние Δz_1 между сечениями z_1 и z_2 , можно определить положение линии ската AB , а, следовательно, и всей плоскости скатывания, в том числе точек C и D .

Область BEF может быть определена двумя способами. Исходя из заданной производительности аппарата, эта область определена формулой (3). К сожалению, во втором случае невозможно определить длину отрезка EF в явном виде, поэтому приведем совокупность уравнений, определяющих эту величину неявно.

$$x_B = R_z \cos \tau, \quad y_B = R_z \sin \tau; \quad (4)$$

$$x_A = R_b \cos \varphi, \quad y_A = R_b \sin \varphi; \quad (5)$$

$$(x_A - R_b \cos t)^2 + (z_2 - z_1)^2 + \text{ctg}^2 \alpha |y_A - R_b \sin t| (y_A - R_b \sin t) = 0; \quad (6)$$

$$-y_B (x_A - R_b \cos t) + \text{ctg}^2 \alpha |y_A - R_b \sin t| x_B = 0; \quad (7)$$

$$\theta = \tau + \arccos(R_z / R_b); \quad (8)$$

$$x_D = R_b \cos \theta, \quad y_D = R_b \sin \theta; \quad (9)$$

$$\Delta z = (z_1 - z_2) \frac{-2(x_D(x_B - x_A) + y_D(y_B - y_A))}{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}. \quad (10)$$

В результате решения системы уравнений (3) – (10) можно отыскать координаты точки D , и делая допущение о параллельности хорд DF и HC , определить коэффициент заполнения в сечении z_3 . Очевидно, что аналогичным образом можно подойти к определению коэффициента заполнения в любом произвольном сечении барабана, выстраивая цепочку последовательных переходов по предложенной схеме от одного сечения к другому. Указанный алгоритм использован при разработке программного обеспечения для расчета распределения материала по длине барабана. Для проверки адекватности предложенной модели распределения материала по длине барабана проведено специальное экспериментальное исследование на установке длиной 1,25 м и диаметром 0,3 м с подпорным кольцом шириной 0,025 м. Со стороны загрузочного торца барабан связан трубопроводом с дозирующим устройством (тарельчатый питатель), а с другой – с приемной емкостью для материала (гранул полистирола). После выхода процесса на стационарный режим барабан и питатель одновременно останавливались и производились замеры высоты сегмента засыпки по длине барабана с последующим вычислением коэффициента заполнения.

Измерения проводились при различных расходах материала и угловых скоростях вращения барабана. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов свидетельствует об удовлетворительной адекватности предложенного метода определения распределения материала по длине вращающегося барабана. Адекватность подтверждена путем построения доверительного интервала для измеренных значений высоты сегмента засыпки материала в барабане при 5 %-ном уровне значимости.

В целом полученные результаты позволяют наблюдать хорошее количественное и качественное соответствие между расчетными и экспериментальными значениями высоты засыпки по всей длине барабана за исключением небольшого участка вблизи разгрузочного его торца. Наблюдаемое несоответствие расчетных и экспериментальных результатов на этом участке объясняется наличием граничных эффектов.

Исследования, проведенные в работе, позволяют утверждать, что допущение о постоянстве коэффициента заполнения по длине барабана, в общем случае, является достаточно грубым. В связи с этим возникает необходимость редуцировать ранее принятое допущение о постоянстве коэффициента заполнения в пространстве и во времени, заменив его на предположение о независимости коэффициента только от времени с введением новой переменной

$$S(z) = \pi R_{\text{бар}}^2 \beta(z). \quad (11)$$

В этом случае уравнение динамики распределения целевого компонента примет вид

$$\rho S(z) \frac{\partial c(t, z)}{\partial t} = \frac{\partial (w S(z) c(t, z))}{\partial z} - D_{\text{пр}} \frac{\partial}{\partial z} \left(S(z) \frac{\partial c(t, z)}{\partial z} \right) + c_{\text{н}} I_l - \frac{\rho \omega_{\text{л}} F_{\text{л}}}{2\pi} c(t, z) + \frac{\rho \omega_{\text{л}} F_{\text{л}}}{2\pi} I \frac{1}{2} \sum \left\{ \frac{1}{2} g_i^1(z) \bar{c}_i^1(t - t_z) + g_i^2(z) \bar{c}_i^2(t - t_z) + \frac{1}{2} g_i^3(z) \bar{c}_i^3(t - t_z) \right\}, \quad (12)$$

где $S(z)$ – площадь засыпки материала в барабане в сечении, соответствующем координате z .

В связи с тем, что загрузочное устройство существующих промышленных аппаратов обеспечивает подачу исходной смеси в барабан на относительно небольшом участке его длины, становится возможным, с целью упрощения уравнения динамики разделения, ограничиться случаем точечной загрузки материала в аппарат. При этом функция плотности распределения загрузки материала по длине барабана I_l будет тождественной функции Дирака $\delta(z)$, сосредоточенной в точке загрузки z_0 , а массовые расходы потоков материала в барабане от точки загрузки в направлении каждого из торцов будут постоянны. Таким образом, функция загрузки I_l примет вид:

$$I_l = -G_1; \quad z < z_0; \quad I_l = 0; \quad z = z_0; \quad I_l = G_2; \quad z > z_0, \quad (13)$$

где G_1 и G_2 – результирующие потоки материала в направлении левого и правого торцов барабана соответственно.

Уравнение (12) решается численным методом при граничных условиях, определяющих отсутствие обратного потока компонентов через торцы барабана.

С целью проверки адекватности модернизированной модели многоступенчатой сепарации зернистых материалов в аппарате "Мультисег", учитывающей неоднородность коэффициента заполнения, было проведено сравнение расчетного и экспериментального распределения концентраций целевого компонента по длине барабана. Сравнение результатов моделирования свидетельствует об их адекватности. Среднее квадратичное отклонение результатов составило около 6 %.

В **третьей главе** проводится математическое моделирование процесса многоступенчатой сепарации в барабанном сепараторе "Мультисег", имеющее своей целью исследование влияния отдельных конструктивных и технологических параметров, а также некоторых их совокупностей на технико-экономические показатели работы аппарата и, в результате, определение комплекса управляющих факторов, необходимого для постановки задачи оптимизации.

В качестве модельной зернистой пшеницы и ржи, называемая "суржей". является трудноразделяемой и ее технологическую проблему для Черноземья, но и многих других моделировании, состояла из содержанием последних 10 % (по массе). определен в соответствии с полученным ранее.

На рис. 4 показано одно из компонентов в потоке смеси, покидающей полученного распределения значение отношения среднего значения некоторой центральной части потока с концентрации C_0 этого компонента в

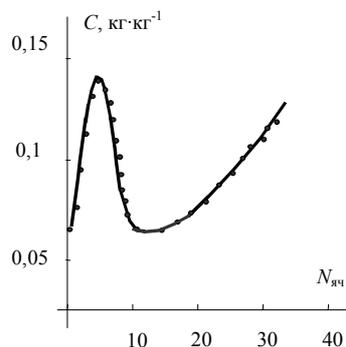


Рис. 4 Относительное распределение целевого компонента (ржи) по ячейкам кюветы для гравитационного потока

$$K_p = C_2^{\text{max}} / C_0. \quad (G_{\text{уд}} = 4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}) \text{ смеси рожь-пшеница} \quad (14)$$

Анализ полученных распределений частиц целевого компонента (рис. 4) свидетельствует о том, что трудно выделить какой-либо превалирующий механизм их отделения. Отсутствие ярко выраженного ядра потока с повышенной концентрацией какого-либо компонента и вместе с тем некоторая наблюдаемая тенденция к расхождению компонентов по высоте слоя позволяет сделать вывод об относительно равнозначном влиянии на разделение эффектов миграции и сегрегации.

Основными конструктивными и технологическими параметрами, определяющими эффективность функционирования сепаратора "Мультисег" являются: длина аппарата, количество отклоняющих элементов сепарирующей насадки и их длина, диаметр барабана, число лопастей подъемно-лопастной насадки и их высота, длина сепарирующего ската, угловая скорость вращения барабана, выход продукта, производительность аппарата по сырью, коэффициент заполнения аппарата и его изменение по длине барабана. Процесс сепарации происходит внутри барабана на

среде при исследовании выбрана зерновая смесь. Такой выбор объясняется тем, что указанная смесь сепарация представляет собой серьезную сельского хозяйства не только Центрального регионов страны. Зерновая смесь, использованная при выровненных по размеру зерен пшеницы и ржи с Коэффициент разделения для смеси пшеница-рожь традиционной методикой по рекомендациям,

полученных распределений частиц контрольного сыпной порог шероховатого ската. На основе коэффициента разделения вычисляли как максимальное концентрации C_2^{max} целевого компонента (ржи) в массовой долей 0,5 от общего потока к средней смеси, подаваемой на скат.

множестве ступеней (ячеек) сепарации при противоточном последовательном транспортировании неоднородных частей потока от ступени к ступени. Поэтому общая длина ячеек сепарации, эквивалентная длине барабана, является одним из основных технологических размеров аппарата.

Однако очевидно, что один и тот же эффект сепарации может быть достигнут при различных сочетаниях числа и длины ячеек сепарации. В связи с этим первостепенное значение приобретает задача определения числа ячеек сепарации (отклоняющих элементов) сепарирующей насадки, приходящихся на единицу длины барабана. Теоретический анализ задачи позволяет сделать вывод о целесообразности предельного увеличения числа отклоняющих элементов на единицу длины сепарирующей насадки, поскольку это способствует снижению эффекта продольного перемешивания материала, обусловленного действием насадки.

Опыт использования сепараторов "Мультисег" для переработки различных зерновых и бобовых культур позволяет выбрать рациональную длину ячейки сепарации, равную 0,1 м. При таком расстоянии между отклоняющими элементами достигается достаточно надежное функционирование сепарирующей насадки без забивки ячеек сорными примесями. Оценка степени влияния числа ступеней сепарации при фиксированной их длине на эффективность процесса проведена методом математического моделирования. Моделирование выполнено с использованием математической модели, представленной в предыдущей главе, для зерновой смеси рожь-пшеница с содержанием ржи 10 % (по массе).

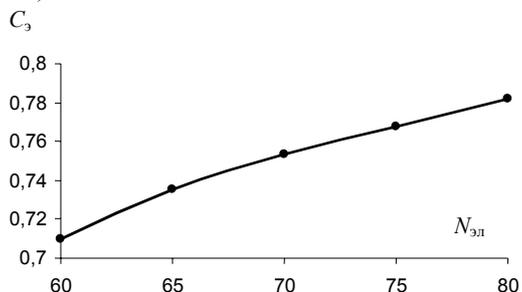


Рис. 5
Зависимость
эффективности
сепарации от
количества отклоняющих элементов (длины аппарата);

сепаратора "Мультисег" является диаметр барабана. Влияние диаметра барабана на эффективность процесса сепарации чрезвычайно многосторонне. Увеличение этого параметра при неизменном коэффициенте заполнения аппарата приводит к снижению продольной скорости движения материала в аппарате, что является, на первый взгляд, положительным фактором, поскольку чем меньше эта скорость, тем дольше материал, направляемый отклоняющими элементами к разгрузочному торцу, обогащается частицами целевого компонента смеси. Однако пропорционально квадрату диаметра барабана увеличивается масса засыпки материала в нем, что приводит к усилению эффектов перемешивания в аппарате вследствие уменьшения относительной доли потока разделения в общем балансе потоков материала в аппарате. Увеличение диаметра также позволяет разместить в барабане подъемно-лопастную насадку, имеющую лопасти большей высоты и тем самым обеспечить необходимую подачу материала на шероховатый скат при меньшей угловой скорости вращения барабана. Однако при этом необходимо учесть, что с уменьшением скорости вращения барабана снижается транспортирующая способность барабана. Вследствие этого увеличивается перепад коэффициента заполнения по длине барабана, что подтверждается результатами проведенного в настоящей работе моделирования. Еще одним аспектом влияния диаметра барабана на эффективность сепарации является возможность увеличения длины сепарирующей пластины. Вследствие этого становится возможным добиваться больших значений коэффициента разделения. Однако необходимо учитывать, что коэффициент разделения повышается с увеличением длины ската лишь до некоторого предела. Это объясняется достижением равновесия между эффектами разделения и перемешивания частиц на определенной длине ската. Кроме того, диаметр барабана в совокупности с длиной ската определяет высоту, на которой находится блок отклоняющих элементов над засыпкой материала. Чем больше эта высота, тем больше взаимное продольное смещение неоднородных потоков материала, покидающих ячейку сепарации. Влияние этого фактора на эффективность сепарации представляется очевидным, поскольку при величинах смещения, не соответствующих длине ячейки сепарации (как больших, так и малых), будет усиливаться продольное перемешивание материала.

Также следует заметить, что очевидными отрицательными сепаратора и энергоемкости зависимости эффективности на рис. 6. Моделирование барабана не сопровождалось технологических параметров. свидетельствуют о наличии точки сепарации от диаметра барабана, поскольку при меньших диаметрах отклонение потоков материала, увеличением диаметра правее продольного перемешивания в чего эффективность сепарации величины высоты падения отклоняющих элементов, сами могут играть отрицательную роль.

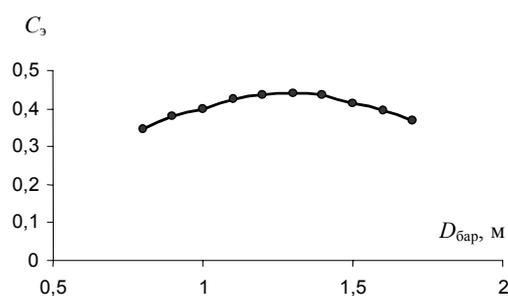


Рис. 6 Зависимость эффективности сепарации от диаметра барабана $\omega = 0,5 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$; $K_p = 1,2$

Аналогичные зависимости эффективности сепарации получены для коэффициента разделения (рис. 7, а), высоты лопастей (рис. 7, б), их количества (рис. 7, в), угловой скорости вращения барабана (рис. 7, г).

Как показывает анализ результатов моделирования, коэффициент разделения является наиболее существенным параметром процесса сепарации зернистых материалов в соответствии с технологией "Мультисег". Влияние этого фактора более значительное, чем влияние скорости вращения барабана, количества лопастей и их высоты. Однако при этом необходимо обратить внимание на то, что величина коэффициента разделения зависит не только от физико-механических свойств частиц сепарируемой зернистой среды, но и от гидродинамической обстановки в гравитационном потоке на шероховатом скате. Последняя же, в свою очередь, формируется под влиянием комплекса конструктивных и технологических параметров барабана, таких как диаметр и скорость вращения барабана, число и высота подъемных лопастей.

С учетом специфики процесса введем в качестве показателя его эффективности отношение производительности аппарата по готовому продукту к производительности по сырью C_3 . Результаты моделирования зависимости эффективности сепарации от числа отклоняющих элементов и, следовательно, от длины барабана представлены на рис. 5.

Целевым продуктом при разделении указанной смеси является пшеница с содержанием в ней примеси ржи до 4 %. Результаты моделирования представляют собой решение однофакторной задачи, поскольку в процессе моделирования предполагались неизменными не только все технологические параметры аппарата, но и производительность по готовому продукту. Анализ результатов моделирования показывает, что с увеличением числа отклоняющих элементов с 60 до 80 эффективность сепарации возрастает примерно на 10 %, что указывает на значительное влияние длины аппарата на эффективность его работы. С другой стороны, с увеличением количества отклоняющих элементов и ростом длины сепаратора возрастает его металлоемкость, момент вращающихся масс и энергоемкость процесса.

Другим важным технологическим и конструктивным параметром барабанного сепаратора является диаметр барабана. Влияние диаметра барабана на эффективность процесса сепарации чрезвычайно многосторонне. Увеличение этого параметра при неизменном коэффициенте заполнения аппарата приводит к снижению продольной скорости движения материала в аппарате, что является, на первый взгляд, положительным фактором, поскольку чем меньше эта скорость, тем дольше материал, направляемый отклоняющими элементами к разгрузочному торцу, обогащается частицами целевого компонента смеси. Однако пропорционально квадрату диаметра барабана увеличивается масса засыпки материала в нем, что приводит к усилению эффектов перемешивания в аппарате вследствие уменьшения относительной доли потока разделения в общем балансе потоков материала в аппарате. Увеличение диаметра также позволяет разместить в барабане подъемно-лопастную насадку, имеющую лопасти большей высоты и тем самым обеспечить необходимую подачу материала на шероховатый скат при меньшей угловой скорости вращения барабана. Однако при этом необходимо учесть, что с уменьшением скорости вращения барабана снижается транспортирующая способность барабана. Вследствие этого увеличивается перепад коэффициента заполнения по длине барабана, что подтверждается результатами проведенного в настоящей работе моделирования. Еще одним аспектом влияния диаметра барабана на эффективность сепарации является возможность увеличения длины сепарирующей пластины. Вследствие этого становится возможным добиваться больших значений коэффициента разделения. Однако необходимо учитывать, что коэффициент разделения повышается с увеличением длины ската лишь до некоторого предела. Это объясняется достижением равновесия между эффектами разделения и перемешивания частиц на определенной длине ската. Кроме того, диаметр барабана в совокупности с длиной ската определяет высоту, на которой находится блок отклоняющих элементов над засыпкой материала. Чем больше эта высота, тем больше взаимное продольное смещение неоднородных потоков материала, покидающих ячейку сепарации. Влияние этого фактора на эффективность сепарации представляется очевидным, поскольку при величинах смещения, не соответствующих длине ячейки сепарации (как больших, так и малых), будет усиливаться продольное перемешивание материала.

увеличение диаметра барабана чревато такими последствиями, как повышение металлоемкости процесса сепарации. Результаты моделирования процесса сепарации от диаметра барабана представлены в предположении, что изменение диаметра изменением каких-либо конструктивных и Результаты моделирования, представленные на рис. 6, максимума в зависимости эффективности процесса Левое этой точки эффективность сепарации ниже, барабана происходит незначительное по величине ссыпавшегося с блока отклоняющих элементов. С точки максимума начинает доминировать поток массе материала, находящегося в засыпке, вследствие также снижается. Кроме того, слишком большие (отклонения) потоков материала, ссыпавшегося с блока

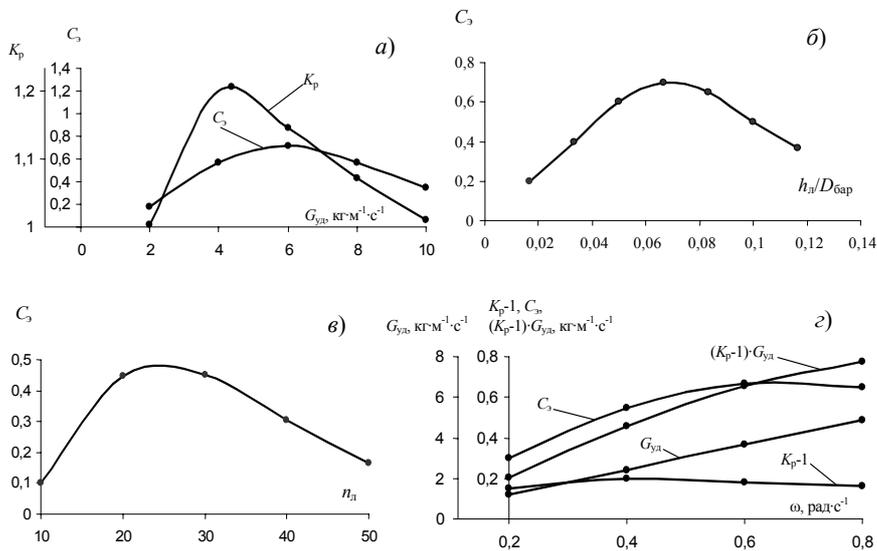


Рис. 7 Зависимости эффективности сепарации зерновой смеси рожь-пшеница в барабанном аппарате ($D_{\text{бар}} = 1,2$ м; $L_{\text{бар}} = 6$ м) от:

a – удельного расхода материала на сепарирующем скате; *б* – высоты лопастей ($K_p = 1,2$);

в – количества лопастей ($\omega = 0,5$ рад \cdot с $^{-1}$; $h_{\text{л}} = 0,13$ м);

з – угловой скорости вращения барабана ($h_{\text{л}} = 0,08$ м)

Комплексное влияние скорости вращения барабана на эффективность процесса (рис. 7, *з*) объясняется тем, что с изменением скорости вращения изменяются не только условия разделения зернистой смеси в сдвиговом потоке на сепарирующем скате, но и гидродинамическая обстановка в засыпке материала. Последнее обстоятельство приводит к изменению транспортирующей способности барабана, что отчетливо обнаруживается в результате исследований, приведенных в настоящей работе, и становится причиной изменения коэффициента заполнения аппарата по его длине. В свою очередь, взаимосвязанное изменение скорости вращения и коэффициента заполнения барабана оказывает существенное влияние на $G_{\text{вых}}$, кг \cdot с $^{-1}$ продольное перемешивание материала и энергопотребление.

На рис. 8 представлена зависимость $G_{\text{вых}} = f(G_{\text{вх}})$ по высокому значению производительности по сырью. вывод о том, что одна и та же достигнута при двух связи с этим при выборе свести нагрузку по исходному обеспечивающему выполнение затрат, учитывающих и затраты на транспортировку отходов. Целесообразность такого вывода объясняется спецификой задачи сезонной переработки зерна при минимальных общих затратах.

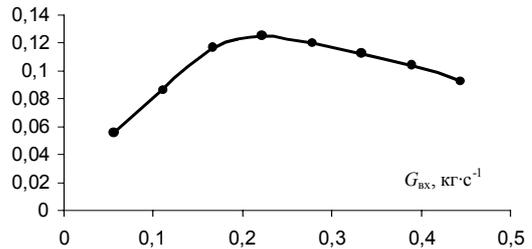


Рис. 8 Зависимость производительности сепаратора по готовому продукту от производительности по сырью для смеси пшеница-рожь при стабильных условиях сепарации на скате ($G_{\text{уд}} = 4,2$ кг \cdot м $^{-1}$ \cdot с $^{-1}$)

Результаты моделирования, приведенные на рис. 8, позволяют сделать весьма важный вывод о том, что каждому сочетанию конструктивных и технологических параметров барабанного сепаратора соответствует определенная величина нагрузки по сырью $G_{\text{вх}}^*$, которая обеспечивает максимум производительности по готовому продукту. Последняя же является одной из важнейших характеристик, определяющих технико-экономические показатели процесса. Таким образом, если известны такие конструктивные и технологические параметры барабанного сепаратора, как длина барабана, его диаметр, количество и размер отклоняющих элементов, длина сепарирующего ската, количество и высота лопастей подъемно-лопастной насадки, угловая скорость вращения барабана, то при наличии данных по кинетике процесса разделения в потоке зернистой среды на гравитационном скате и с учетом требования по содержанию целевого компонента в готовом продукте, можно сформулировать и решить одну из возможных задач оптимизации, а именно: найти такое значение режимного параметра $G_{\text{вх}}$, чтобы критерий оптимизации $G_{\text{вых}}$ (производительность по готовому продукту) был максимален. Приведенную выше оптимизационную задачу следует рассматривать как вспомогательную для решения общей задачи оптимизации и одновременно для вычисления такого режимного параметра, как производительность по сырью. Решение этой задачи делает возможным при постановке общей задачи поиска оптимального проектного решения не вводить в число варьируемых параметров производительность по исходному сырью и выход товарного продукта. От максимальной производительности по готовому продукту зависит годовое время работы сепаратора и, соответственно, эксплуатационные затраты.

Четвертая глава посвящена оптимизации конструктивных и технологических параметров сепаратора "Мультисег". В качестве критерия оптимизации, наиболее полно отражающего эффективность работы сепаратора "Мультисег", была выбрана величина приведенных затрат на сепарацию. Приведенные затраты представляют собой сумму капитальных и эксплуатационных затрат, отнесенную к годовой производительности барабанного сепаратора по готовому продукту:

$$ПЗ = (З_k + З_э) / G_{\text{год}} \quad (15)$$

В качестве варьируемых параметров в постановке задачи оптимизации целесообразно взять длину барабана, его диаметр, угловую скорость вращения, количество лопастей подъемно-лопастной насадки, их высоту, поскольку указанные характеристики сепаратора однозначно определяют как капитальные, так и эксплуатационные затраты на сепарацию, в соответствии с результатами исследований, проведенных в главе 3. Математически постановка задачи оптимального проектирования барабанного сепаратора "Мультисег" выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
\Pi_3^*(R_{\text{бар}}^*, L_{\text{бар}}^*, \omega^*, n_{\text{л}}^*, h_{\text{л}}^*, T_{\text{год}}) &= \min_U \Pi_3(R_{\text{бар}}, L_{\text{бар}}, \omega, n_{\text{л}}, h_{\text{л}}, T_{\text{год}}); \\
T_{\text{год}} &= G_{\text{год}} / G_{\text{вых}}^*; \\
G_{\text{вых}}^* &= \max G_{\text{вых}}(G_{\text{вх}}); \\
g(R_{\text{бар}}, n_{\text{л}}, h_{\text{л}}) &= 2(R_{\text{бар}} - h_{\text{л}}) \sin(\pi / n_{\text{л}}) - \Delta S_{\text{min}} \geq 0; \\
U &= \left\{ \begin{array}{l} R_{\text{бар}} \left| \underline{R_{\text{бар}}} \leq R_{\text{бар}} \leq \overline{R_{\text{бар}}} \right. \\ L_{\text{бар}} \left| \underline{L_{\text{бар}}} \leq L_{\text{бар}} \leq \overline{L_{\text{бар}}} \right. \\ \omega \left| \underline{\omega} \leq \omega \leq \overline{\omega} \right. \\ n_{\text{л}} \left| \underline{n_{\text{л}}} \leq n_{\text{л}} \leq \overline{n_{\text{л}}} \right. \\ h_{\text{л}} \left| \underline{h_{\text{л}}} \leq h_{\text{л}} \leq \overline{h_{\text{л}}} \right. \end{array} \right\}; \\
\rho S(z) \frac{\partial c(t, z)}{\partial t} &= \frac{\partial (wS(z)c(t, z))}{\partial z} - D_{\text{пр}} \frac{\partial}{\partial z} \left(S(z) \frac{\partial c(t, z)}{\partial z} \right) + c_{\text{н}} I_l - \frac{\rho \omega n_{\text{л}} F_{\text{л}}}{2\pi} c(t, z) + \\
&+ \frac{\rho \omega n_{\text{л}} F_{\text{л}}}{2\pi} l \frac{1}{2} \sum \left\{ \frac{1}{2} g_i^1(z) \bar{c}_i^1(t - t_{\text{к}}) + g_i^2(z) \bar{c}_i^2(t - t_{\text{к}}) + \frac{1}{2} g_i^3(z) \bar{c}_i^3(t - t_{\text{к}}) \right\}; \\
\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0, L} &= 0; \\
c(0, z) &= c_0 = \text{const.}
\end{aligned}$$

(16)

В качестве метода решения задачи (16) выбран метод последовательного квадратичного программирования, что позволило получить алгоритм определения оптимальных конструктивных и технологических параметров барабанного сепаратора "Мультисег". Результаты решения задачи оптимального проектирования в сравнении с параметрами промышленного варианта барабанного сепаратора приведены в табл. 1.

Кроме этого, в рамках работы предложена модернизация существующих аппаратов путем изменения параметров насадочного барабана. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении приведенных затрат на получение продукта заданного качества на 17 %, достигаемом за счет повышения производительности аппарата и снижения энергозатрат на вращение барабана.

Таблица 1

Технологические и технико-экономические показатели промышленного и оптимально спроектированного сепаратора "Мультисег"

Характеристики сепаратора	Сепаратор	
	Промышленный	Оптимально спроектированный
Диаметр барабана, м	1,3	1,2
Длина барабана, м	6,0	6,5
Количество элементов сепарирующей насадки, шт.	60	65
Количество подъемных лопастей, шт.	18	29
Высота лопастей, м	0,13	0,083
Скорость вращения барабана, рад·с ⁻¹	0,95	0,6
Металлоемкость барабана с насадками, кг	1714	1883
Мощность привода, кВт	5,5	3,5
Производительность по готовому продукту для зерновой смеси пшеница-рожь, кг·с ⁻¹	0,065	0,075
Приведенные затраты, руб.·г ⁻¹	22,01	16,95

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Предложен инженерный метод прогнозирования распределения зернистого материала в непрерывнодействующем аппарате с вращающимся барабаном в зависимости от физико-механических свойств среды, технологических и конструктивных параметров барабана при малой скорости вращения.

2 Разработана усовершенствованная математическая модель многоступенчатой сепарации зернистых материалов в аппарате "Мультисег", учитывающая влияние неоднородности распределения материала в аппарате на процесс разделения.

3 Сформулирована и решена задача оптимизации конструктивных и технологических параметров барабанного сепаратора зернистых материалов "Мультисег". В качестве метода решения оптимизационной задачи предложено использовать метод последовательного квадратичного программирования.

4 На основе оптимизационного алгоритма предложена методика определения оптимальных конструктивных и технологических параметров сепаратора "Мультисег" (диаметра барабана, количества отклоняющих элементов, количества и высоты подъемных лопастей, угловой

скорости вращения). Методика использована для расчета оптимальной конструкции сепаратора зерновой смеси рожь-пшеница, обеспечивающей снижение приведенных затрат на 23 %.

5 Разработаны рекомендации по модернизации промышленных сепараторов зерна путем изменения насадки барабана (количества и высоты подъемных лопастей) и угловой скорости его вращения, позволяющие снизить приведенные затраты на производство единицы продукции на 17 %.

6 Результаты работы в виде рекомендаций по модернизации конструкции барабанного сепаратора "Мультисер" использованы в технологическом процессе производства зерновых продуктов в СПК "Новый Мир" Моршанского района Тамбовской области.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

a_i, b_i – координаты границ i -го отклоняющего элемента; C – концентрация целевого компонента, $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$; C_s – эффективность сепарации; $D_{\text{пр}}$ – коэффициент продольного перемешивания, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; $D_{\text{бар}}$ – диаметр барабана, м; $F_{\text{л}}$ – площадь засыпки материала на лопасти, м^2 ; $\text{Fr} = \omega^2 R_{\text{бар}} / g$ – критерий Фруда; g – ускорение свободного падения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$; g_i^1, g_i^2, g_i^3 – плотности распределения компонента смеси для i -й ячейки по зонам; $G_{\text{вх}}$ – производительность сепаратора по сырью, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; $G_{\text{вых}}$ – производительность сепаратора по готовому продукту, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; $G_{\text{год}}$ – сезонная годовая производительность аппарата по готовому продукту, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; $G_{\text{уд}}$ – удельный поток материала на скате, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$; $h_{\text{л}}$ – высота лопасти, м; I_z – поток материала, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; I_l – плотность распределения загрузки по длине барабана, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; I_v^+, I_v^- – функции источников и стоков целевого компонента, с^{-1} ; K_p – коэффициент разделения на сепарирующем скате; l – ширина отклоняющих элементов, м; $L_{\text{бар}}$ – длина барабана, м; $n_{\text{л}}$ – количество подъемных лопастей, шт.; $N_{\text{эл}}$ – количество отклоняющих элементов, шт.; $S(z)$ – площадь сегмента засыпки в сечении z барабана, м^2 ; $R_{\text{бар}}$ – радиус барабана, м; ΔS_{min} – минимально допустимое расстояние между кромками лопастей, м; t – время, с; t_k – время контакта частиц с сепарирующей насадкой, с; w – осредненная продольная скорость движения материала, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; x, y, z – декартовы координаты; ПЗ – приведенные затраты на сепарацию, $\text{руб}\cdot\text{т}^{-1}$; α_0 – угол естественного откоса материала, град; β – коэффициент заполнения барабана, $\text{м}^3\cdot\text{м}^{-3}$; ω – угловая скорость вращения барабана, $\text{рад}\cdot\text{с}^{-1}$.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Романов А. А., Пронин В. А. К вопросу об оптимизации технологических параметров гравитационного сепаратора "Мультисер" // Труды ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. С. 8 – 12.
2. Пронин В. А., Уколов А. А., Романов А. А. Моделирование и оптимизация процесса многоступенчатой сепарации "Мультисер" // Труды ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. С. 18 – 23.
3. Ukolov A., Dolgunin V., Romanof A. and Klimov A. Gravity separation technology of particulate materials of high uniformity // HUN-Pra-PARTEC International Conference on Practical Aspects of Particle Technology, Proceedings, Budapest, Hungary, 2001. P. 215 – 218.
4. Dolgunin V., Ukolov A., Romanov A., Kudy A., Klimov A. Separation technology based on segregation effects in rapid gravity flows // Proceedings of XXI International Mineral Processing Congress, Rome, 2000, V. C7-44. P. 057 – 062.