

ДЕМИН Олег Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И
КОНСТРУКЦИЙ ЛОПАСТНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ**

05.02.13. – Машины, агрегаты и процессы
(химической промышленности)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Тамбов – 2003

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре "Прикладная механика и сопротивление материалов".

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Першин Владимир Федорович

кандидат технических наук, профессор
Курочкин Иван Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Каталымов Анатолий Васильевич

доктор технических наук, профессор
Чайников Николай Александрович

Ведущее предприятие Открытое акционерное общество
научно-исследовательский институт
резинотехнического машиностроения
(ОАО "НИИРТмаш")

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2003 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 Тамбовского государственного технического университета по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат, скрепленные гербовой печатью, направлять по адресу: 392620, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доцент

В. М. Нечаев

Подписано в печать 20.02.2003
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84 / 16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем: 0,96 усл. печ. л.; 1,00 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 129

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Необходимой операцией для многих технологических процессов является смешение сыпучих материалов. В химической промышленности, агропромышленном комплексе, производстве строительных материалов, пищевой промышленности и других отраслях для этих целей используют гравитационные, центробежные, барабанные, вибрационные, червячно-лопастные и прочие смесители. Их конструкции выбираются, как правило, исходя из особенностей производства, характеристики смешиваемых материалов, необходимой производительности, требуемого качества готовой смеси и экономических возможностей предприятия.

Создание новых и модернизация существующих смесителей часто базируется на данных экспериментальных исследований без детального выяснения механизма процесса смешения. Одним из возможных путей совершенствования смесительного оборудования для сыпучих материалов является применение конструкций смесителей с возможностью упорядоченного перемещения частиц внутри камеры смешения, а также разработка методики расчета основных режимных и конструктивных параметров, которые обеспечивают данные перемещения частиц и стабильное достижение требуемого качества смеси.

Возможностью управления процессом смешения, универсальностью, высокой производительностью, быстрой и несложной переналадкой для работы с различными сыпучими материалами обладают лопастные смесители. Ввиду малой изученности процесса, отсутствия универсальной физической модели перераспределения частиц материала внутри одновального лопастного смесителя, необходимы экспериментальные и теоретические исследования механизма смешения с целью совершенствования методов расчета и конструкций этих смесителей.

Данная работа выполнялась в соответствии с научно-техническими программами Министерства образования РФ: "Вузовская наука – регионам", код Н.Р. 200 – 1998 г.; "Вузовская наука – регионам", код 200 – 1999 г.; "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий", код 001 – 2000 г.; "Производственные технологии" – 2001 г.

Цель работы. Исследование движения сыпучего материала в аппаратах с лопастными рабочими органами и создание на этой основе математической модели процесса смешения твердых компонентов, совершенствование конструкции и методики расчета режимных и конструктивных параметров одновального лопастного смесителя, обеспечивающих получение требуемого качества смеси, разработка рекомендации по проектированию и выбору режимных параметров смесителей указанного типа.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи: проведен анализ способов смешения, конструкций одновальных лопастных смесителей и результатов их использования в промышленности; проведено комплексное исследование процессов, протекающих в одновальном лопастном смесителе; разработана математическая модель процесса смешения.

Научная новизна. Выявлен эффект смешения сыпучих материалов за счет движения частиц внутри зоны, которая образуется перед движущейся лопастью.

Предложена новая физическая модель процесса перемещения частиц при движении лопасти в сыпучем материале с учетом выявленного эффекта смешения и получены зависимости для расчета объемов перемещаемого материала.

Разработана усовершенствованная математическая модель процесса смешения в одновальном лопастном смесителе, в которую введены параметры, учитывающие выявленный эффект и особенности перераспределения частиц смешиваемых материалов.

Практическая ценность. На базе математической модели процесса смешения разработана методика расчета основных режимных и конструктивных параметров одновального лопастного смесителя. Выданы рекомендации по проектированию рабочих органов, механизма загрузки/выгрузки исходных компонентов и выбору режимных параметров одновального лопастного смесителя, обеспечивающих требуемое качество смеси. Результаты проведенных комплексных исследований позволили предложить способ смешения порошкообразных и мелкозернистых сыпучих материалов и устройство для его осуществления, которые позволили снизить время процесса на 15 ... 20 %.

Автор защищает. Результаты экспериментальных и теоретических исследований, позволившие выявить эффект смешения сыпучих материалов в лопастном смесителе за счет движения частиц внутри "застойной" зоны и определить интервалы значений режимных и конструктивных параметров, при ко-

торых существует данный эффект. Физическую модель процесса перемещения частиц при движении лопасти в сыпучем материале с учетом обновления частиц внутри "застойной" зоны и зависимости для расчета объемов перемещаемого при этом материала. Математическую модель процесса смешения сыпучих материалов в одновальном лопастном смесителе, основанную на анализе выявленных механизмов процесса смешения. Методику определения основных режимных и конструктивных параметров одновального лопастного смесителя. Способ приготовления многокомпонентной смеси сыпучих материалов и конструкцию лопастного одновального смесителя, созданные на принципе организации различных видов перемещения материала на определенных стадиях процесса смешения.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: 15 Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях»; 11 Международной научно-практической конференции "Научно-технический прогресс в инженерной сфере АПК России – проблемы развития машинных технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции"; V, VI и VII научных конференция Тамбовского государственного технического университета.

Реализация результатов работы. Промышленные испытания подтвердили, что предложенный способ приготовления смеси сыпучих материалов позволяет получить более стабильное качество смеси и сократить время процесса смешения на 15 %. Методика расчета основных режимных и конструктивных параметров принята к использованию при создании новой конструкции лопастного одновального смесителя.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемых литературных источников. Работа изложена на 210 страницах, содержит 72 рисунка, 4 таблицы и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость, а также основные решаемые в диссертации задачи и методы, обеспечивающие достижение поставленных целей.

В первой главе "Литературно-патентный обзор" дан анализ основных путей повышения эффективности смесителей сыпучих материалов, предлагаемых в настоящее время российскими и зарубежными учеными. С использованием информационных ресурсов Internet и на основе литературно-патентного обзора подробно рассмотрены конструкции и принципы действия основных, применяемых в настоящее время, типов смесителей, отмечены их преимущества и недостатки, выделены те из них, в которых возможна организация управляемого процесса смешения.

Во второй главе "Экспериментально-теоретическое исследование процесса смешения сыпучих материалов" представлены исследования с методиками их проведения и полученными результатами, проведенные с целью составления физической и математической модели процесса смешения в одновальном лопастном смесителе.

Одним из возможных путей повышения эффективности смесителей является использование различных способов загрузки исходных компонентов в смеситель. Влияние способа загрузки компонентов склонных и не склонных к сегрегации экспериментально исследовано на шести лабораторных смесителях широко применяемых в настоящее время (барабанном, *V*-образном и биконическом, смесителе "Пьяная бочка", ленточном и одновальном лопастном) и изготовленных с соблюдением основных критериев подобия физической модели и реального аппарата. В экспериментах использовались модельные материалы, отличающиеся друг от друга цветом и физико-механическими характеристиками: семена люцерны (диаметр частиц – 1 мм, насыпная плотность – 826 кг/м³, цвет – темно-коричневый); пшено (диаметр частиц – 1,95 мм, насыпная плотность – 860 кг/м³, цвет – желтый); песок (диаметр частиц – 0,26 мм, насыпная плотность – 1510 кг/м³, цвет – светло-серый). Преимущество параллельной загрузки наблюдалось практически во всех типах смесителей. В то же время при использовании компонентов, отличающихся по размерам и плотности, во всех смесителях, кроме ленточного и одновального лопастного, присутствует активная сегрегация частиц,

приводящая к нестабильному качеству готовой смеси и, чаще всего, к ухудшению этого качества. Таким образом, из всех рассмотренных типов смесителей были выявлены два смесителя с максимальной возможностью управления процессом смешения.

Анализ различных конструкций ленточных и лопастных смесителей, а также результатов их использования в промышленности показали, что с точки зрения интенсивности процесса смешения и качества готовой смеси они практически одинаковы. При этом однолопастный лопастной смеситель проще в изготовлении и легко перенастраивается на работу с различными по свойствам компонентами. Учитывая это, для дальнейших исследований был выбран однолопастной смеситель.

Для изучения процесса обтекания пластины, используемой в качестве рабочего органа в лопастных смесителях, потоком сыпучего материала проведено теоретическое исследование с использованием метода последовательных приближений (сначала рассматривалось обтекание пластины идеальной жидкостью, а затем изучение основных характеристик ее движения, применительно к сыпучему материалу с учетом поправок) и метода обращенного движения (пластина неподвижна, а поток обтекает пластину с постоянной скоростью W). Функция тока $\psi(x, y)$ и скорость в любой точке потока v при обтекании пластины идеальной жидкостью зависят от скорости потока W , ширины пластины a и угла поворота пластины α относительно оси перпендикулярной направлению движения.

В результате исследований выявлено образование перед пластиной "застойной" зоны, в которой скорость движения потоков v мала по сравнению со скоростью пластины $W = 0,15$ м/с. Размеры "застойной" зоны уменьшаются с увеличением угла поворота пластины относительно оси перпендикулярной направлению движения и скорости. Было сделано допущение о том, что уплотнение сыпучего материала определяется квадратом скорости частиц потока, т.е. кинетическая энергия потока вблизи пластины переходит в потенциальную энергию уплотнения (чем ближе к пластине, тем квадрат скорости меньше, а уплотнение больше). Теоретические исследования позволили определить линии равных квадратов скоростей, которые во многом определяют форму и размеры зоны уплотнения сыпучего материала перед движущейся лопастью.

Результаты экспериментальных исследований, проводимые с целью оценки общности зависимостей, описывающих поведение жидкости и сыпучего материала, показали, что: 1) форма зоны уплотнения перед лопастью по своему характеру соответствует линиям равных квадратов скоростей; 2) в сыпучем материале, также как и в жидкости, перед лопастью существует "застойная" зона. В то же время выявлено существенное отличие – при движении лопасти, расположенной перпендикулярно, либо под углом близким 90° к направлению ее движения, "застойная" зона сформирована из частиц неподвижных относительно пластины.

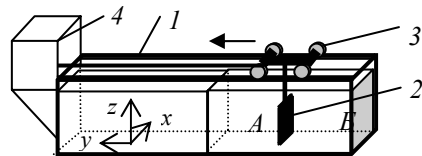


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Экспериментальные исследования зоны уплотнения сыпучего материала перед движущейся лопастью с различным углом поворота относительно направления движения выявили перемещение частиц сыпучего материала, находящихся на удалении от лопасти, в различные стороны от фронта уплотнения. Эксперименты проводились на установке, состоящей из емкости прямоугольной формы с размещенными в ней в поперечном направлении делительными перегородками, между которыми засыпался различный по цвету материал. Шток, на котором закрепляются сменные пластины, имеет возможность перемещения в горизонтальной плоскости вдоль емкости перпендикулярно слоям засыпанного материала.

Теоретические предположения о наличии "застойной" зоны перед пластиной, движущейся в слое сыпучего материала, форма и размеры которой зависят от скорости движения и угла поворота лопасти относительно оси перпендикулярной направлению движения, подтверждены на специальной лабораторной установке. Установка состоит из горизонтальной емкости I, в которую засыпается упорядоченно исследуемый материал (А и Б), и лопасти 2, выполненной в виде плоской пластины, перемещаемой в слое материала вдоль емкости посредством платформы 3 и электропривода 4 (рис. 1).

В первом приближении

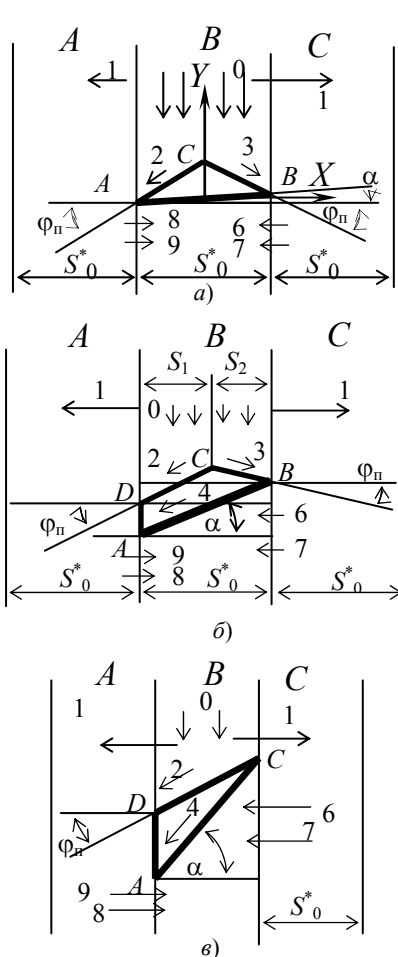


Рис. 2 Схема обтекания пластины сыпучим материалом:
 а) $0^\circ < \alpha < \varphi_{ст}$; б) $\varphi_{ст} < \alpha < \alpha_k$;
 в) $\alpha_k < \alpha < 90^\circ$

Для исследования влияния угла поворота лопастей на энергозатраты в одновальном лопастном смесителе проведен ряд экспериментов на установке, состоящей из неподвижного лабораторного смесителя и электродвигателя, расположенного на подвижной платформе. С одной стороны платформа соединена через динамометр со стенкой, а с другой – через шкивы, находящиеся на валу электродвигателя и смесителя, посредством намотанного на них длинного троса, с лабораторным смесителем. Опыты выявили диапазон углов поворота лопастей ($30^\circ < \alpha < 60^\circ$), в котором получены стабильные значения удельных затрат мощности и работы, затрачиваемой на процесс смешения, для материалов, отличающихся физико-механическими свойствами. Установленные в результате опытов диапазоны углов поворота лопастей связаны с образованием "застойной" зоны перед движущейся лопастью и выявленным эффектом смешения за счет движения частиц внутри нее.

Для исследования влияния угла поворота лопастей на энергозатраты в одновальном лопастном смесителе проведен ряд экспериментов на установке, состоящей из неподвижного лабораторного смесителя и электродвигателя, расположенного на подвижной платформе. С одной стороны платформа соединена через динамометр со стенкой, а с другой – через шкивы, находящиеся на валу электродвигателя и смесителя, посредством намотанного на них длинного троса, с лабораторным смесителем. Опыты выявили диапазон углов поворота лопастей ($30^\circ < \alpha < 60^\circ$), в котором получены стабильные значения удельных затрат мощности и работы, затрачиваемой на процесс смешения, для материалов, отличающихся физико-механическими свойствами. Установленные в результате опытов диапазоны углов поворота лопастей связаны с образованием "застойной" зоны перед движущейся лопастью и выявленным эффектом смешения за счет движения частиц внутри нее.

На основе представлений о механизме смешения, которые были сформулированы в результате экспериментально-теоретических исследований, предложена физическая модель перераспределения частиц при движении лопасти в слое сыпучего материала. Основной поток 0 (рис. 2 и рис. 3) разделяется на потоки 2, 3 и 5 (V_2^*, V_3^*, V_5^*) по внешней границе "застойной" зоны и поток 4 (V_4^*) внутри нее, формирующийся из частиц потоков 2, 3 и 5 (рис. 4). Материал, составляющий "застойную" зону (V_T^*), частично перемещается в зону А в диапазоне углов поворота лопасти от $\varphi_{ст}$ до 90° и полностью остается в зоне В при угле поворота лопасти в диапазоне от 0° до $\varphi_{ст}$. За счет потока 4, т.е. обновления "застойной" зоны,



Рис. 3 Схема обтекания пластины сыпучим материалом в вертикальном сечении

«застойная» зона имеет форму треугольника в горизонтальном сечении (рис. 2) и четырехугольника – в вертикальном сечении (рис. 3). Экспериментально установлено, что при угле поворота пластины больше угла трения сыпучего материала на поверхности пластины начинается одностороннее движение материала внутри "застойной" зоны в направлении поворота лопасти (рис. 2, б и рис. 2, в). "Застойная" зона при этом существует. Основной поток обтекает зону, а сама она обновляется за счет частиц, находящихся на границе этой зоны. Это явление экспериментально исследовано на установке (рис. 1) путем многократной послойной засыпки различного по цвету и плотности материала перпендикулярно направлению движения лопасти, а также с помощью меченных частиц располагаемых в зоне В (рис. 2) на участке шириной S_2 на различном расстоянии от лопасти. Меченные частицы перемещались в зону С, в "застойную" зону ABCD и в зону А. Таким образом, выявлен ранее не учитываемый эффект смешения сыпучих материалов в одновальном лопастном смесителе за счет движения частиц внутри "застойной" зоны. При угле поворота лопасти больше некоторого критического значения ($\alpha > \alpha_k$) "застойная" зона снова принимает форму треугольника (рис. 2, в). Частицы, располагаемые в зоне В, перемещаются в зону А и в зону С на удалении от лопасти, что связано с образованием зоны уплотнения перед движущейся лопастью.

Для определения объемов частиц, переместившихся из одного ряда рабочих органов в соседние ряды за один оборот вала в одновальном лопастном смесителе, в зависимости от угла поворота

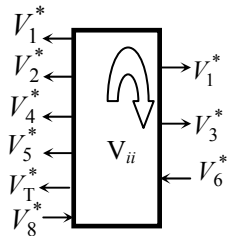


Рис. 4 Схема перемещений объемов материала i -го ряда

частицы из потока 3 перемещаются и в зону C , и в зону A . За лопастью образуются потоки, состоящие из частиц соседних рядов A , C и зоны D над лопастью – 6, 8, 10 (V_6^* , V_8^* , V_{10}^*) и частиц зоны B , вернувшихся обратно – 7, 9, 11 (V_7^* , V_9^* , V_{11}^*). Поток 1 (V_1^*) состоит из частиц перемещающихся на удалении от лопасти при всех значениях угла поворота лопасти (рис. 2). Тот же процесс происходит при следующих перемещениях лопастей в слое сыпучего материала. Лопастной смеситель по длине состоит из нескольких чередующихся зон A , B и C , представляющих собой ряды рабочих органов. Объем материала, переместившийся в потоках (рис. 4) из i -го ряда рабочих органов в соседние ряды (V_1^* , V_2^* , V_3^* , V_4^* , V_5^* ,

V_6^* , V_8^*), можно представить в виде функциональной зависимости от геометрических размеров смесителя и лопастей, режимных параметров работы и физико-механических свойств смешиваемых материалов $V_j^* = K_u f_j (\Gamma_{л}, \alpha, \Phi, n, \Gamma_{см})$.

Суммарный объем материала, переместившегося в соседние ряды, для рассмотренного случая направления поворота лопасти (рис. 2, б) определяется по формулам:

$$V_{i(i-1)}^m = V_{B-A} = V_1^* + V_2^* + V_4^* + V_5^* + V_7^*, \quad (1)$$

$$V_{i(i+1)}^m = V_{B-C} = V_1^* + V_3^*, \quad (2)$$

$$V_{(i+1)i}^m = V_{C-B} = V_6^*, \quad (3)$$

$$V_{(i-1)i}^m = V_{A-B} = V_8^*. \quad (4)$$

Объем материала, оставшегося в ряду после прохождения в нем лопасти, можно представить в виде $V_{ii}^m = V_i^{(m-1)} - V_{i(i-1)}^m - V_{i(i+1)}^m + V_{(i+1)i}^m + V_{(i-1)i}^m$.

В третьей главе "Математическое описание процесса смешивания сыпучих материалов в одновальном лопастном смесителе", с учетом выявленного эффекта смешения, предложена математическая модель процесса смешения в одновальном лопастном смесителе, проведена идентификация параметров и проверена адекватность математической модели реальному процессу.

Учитывая, что процесс смешения в одновальном лопастном смесителе определяется, главным образом, осевым перемещением частиц материала, разбиваем смеситель по длине на ячейки по числу рядов рабочих органов смесителя (система состоит из k элементарных объемов). Считаем, что распределение ключевого компонента в каждой ячейке равномерное по всему элементарному объему. За один переход будем считать такое положение системы, при котором лопасти любого ряда рабочих органов реализуют перемещение частиц из одних ячеек смешения в соседние с ними ячейки. При математическом описании состояние системы после m -перехода определяется вектором состояния $E(m) = E(m-1)P_m$. Координаты вектора есть концентрации ключевых компонентов в элементарном объеме после m -перехода. Для определения вектора состояния была составлена матрица переходных вероятностей, учитывающая конструктивные особенности одновального лопастного смесителя

$$P_m = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{32} & P_{33} & P_{34} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & P_{(k-1)(k-2)} & P_{(k-1)(k-1)} & P_{(k-1)k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{k(k-1)} & P_{kk} \end{vmatrix}.$$

За малый промежуток времени $\Delta t_m = \frac{\gamma^m}{360^\circ} \frac{60}{n} = \frac{\gamma^m}{360^\circ} \frac{2\pi \left(\frac{d}{2} + \frac{b}{2} + \varepsilon \right)}{W}$, находящаяся в i -ой ячейке частица ключевого компонента либо останется в ней, либо перейдет в следующую по направлению потока ячейку. Общее время процесса смешения определяется как сумма малых промежутков времени Δt_m .

Элементы матрицы переходных вероятностей определяются с учетом величины объемов материала, переместившегося при движении лопасти.

$$P_{i(i+1)} = \frac{V_{i(i+1)}^m}{V_i^{(m-1)}}; \quad P_{i(i-1)} = \frac{V_{i(i-1)}^m}{V_i^{(m-1)}}; \quad P_{ii} = 1 - P_{i(i-1)} - P_{i(i+1)},$$

где $V_{i(i+1)}^m$, $V_{i(i-1)}^m$ определяются в зависимости от расположения лопастей в рядах по формулам (1), (2) или (3), (4).

Зная регламент загрузки исходных компонентов, легко определить вектор начального состояния, т.е. концентрации ключевого компонента в ячейках в начале процесса смешения. Если после загрузки исходных компонентов в крайних левых трех рядах расположен только ключевой компонент, а в остальных основной, вектор начального состояния системы в данном случае имеет вид $E(0) = E[1; 1; 1; 0; \dots; 0]$.

Если считать каждую ячейку пробой, то вся смесь в смесителе в любой момент времени t_n может быть оценена с помощью известного коэффициента неоднородности, учитывающего заданную концентрацию ключевого компонента C_0 , концентрацию ключевого компонента в i -ой пробе смеси C_i и количество проб n_n . По значениям коэффициента неоднородности в разные моменты времени получаем зависимость $V_c = f(t)$, характеризующую изменение однородности смеси в модели во времени. Достигнув заданного значения однородности, фиксируется значение времени процесса смешения и считается, что система достигла конечного требуемого состояния.

При идентификации параметров математической модели экспериментально определялись коэффициенты K_u с использованием экспериментальных данных переместившихся объемов (V_{A-B} , V_{C-B} , V_{B-A} , V_{B-C}) для смешиваемых материалов. В результате проверки адекватности математической модели реальному процессу получена удовлетворительная сходимость расчетного и экспериментального времени смешения. В экспериментах применялись два лабораторных лопастных смесителя с различными геометрическими размерами и сыпучие материалы, отличающиеся по плотности, форме и размерам (семена люцерны, пшено, песок, сахар, соль, лимонная кислота, аскорбиновая кислота, крупа кукурузная). С помощью математической модели определены оптимальные углы поворота лопастей, которым соответствует минимальное время смешения для заданного коэффициента неоднородности. Расчет по математической модели при угле поворота лопасти, равном оптимальному значению показал, что если не учитывать выявленный эффект смешения (поток частиц внутри "застойной" зоны), то расчетное время смешения существенно превышает время реального процесса, определяемого экспериментально. С учетом указанного эффекта расчетное время не превышает экспериментальное, более чем на 17 %.

В четвертой главе "Проектирование и расчет лопастного смесителя" приведены рекомендации по проектированию рабочих органов, механизма загрузки/выгрузки и выбору режимных параметров однолопастного лопастного смесителя, методика его расчета, способ приготовления смеси сыпучих материалов и устройство для его осуществления, обеспечивающие стабильное достижение требуемого качества смеси.

На основании анализа конструкций лопастных смесителей и результатов их использования в промышленности выданы рекомендации по проектированию рабочих органов, механизма загрузки/выгрузки и выбору режимных параметров однолопастного лопастного смесителя, которые можно свести к следующему: 1) рабочие органы рекомендуется выполнять в виде плоских пластин; 2) целесообразно использовать от двух до четырех лопастей в каждом ряду рабочих органов, смещенных относительно лопастей соседнего ряда на одинаковый угол γ^m ; 3) загрузочное отверстие рекомендуется выполнять по всей длине смесителя (оно же выполняет функцию выгрузного отверстия путем опрокидывания корпуса смесителя); 4) рекомендуется использовать лопасти с одинаковым углом поворота, расположенными по винтовой линии (одной или двум); 5) коэффициент заполнения 0,35 ... 0,6 объема смесительной камеры; 6) рекомендуемая минимальная окружная скорость движения рабочих органов $W_{\min} = 0,15$ м/с.

Методика расчета включает определение: производительности смесителя $Q = \frac{V_{см}\varphi}{\tau_{см} + \tau_{всп}}$; объема сме-

сительной камеры $V_{см} = \frac{\pi D^2}{4} L - V_{раб.орг}$; объема, занимаемого рабочими органами и валом

$V_{раб.орг} = \frac{\pi d^2}{4} L + \sum_{i=1}^k \sum_{j_n=1}^{N_i} (a_{ij_n} b c_{ij_n})$; ширины лопастей $a_{ij_n} = \frac{t_{л}}{\cos \alpha_{ij_n}}$; длины смесительной камеры

$L = t_{л}(k-1) + 2\chi$; диаметра смесительной камеры $D = 2b + d + 2\varepsilon + 2\delta$; ширины загрузочного отверстия

$l = D \cos(\varphi_{гр.п}^{max} + \zeta)$; ширины лопастей в крайних рядах рабочих органов $a_{1,k} = \frac{\lambda}{\cos \alpha_{1,k}} + \frac{t_{л}}{2 \cos \alpha_{1,k}}$. Высота ло-

пасти, на основе проведенных исследований, определяется из соотношения $2a_{min} > b > \frac{a_{min}}{2}$, а величина

угла ζ из соотношения $\varphi\pi = \frac{180^\circ + 2\zeta}{360^\circ} \pi + \cos \zeta \sin \zeta$.

Методика расчета однолопастного смесителя реализована на ПЭВМ с использованием интегрированной среды программирования *Borland Delphi 6.0* и включает: 1) ввод исходных данных (задаются параметры на выбор с учетом выданных нами рекомендаций и пожеланий заказчика, а также физико-механические характеристики смешиваемых компонентов и результаты лабораторных исследований по определению перемещаемых объемов); 2) идентификация параметров модели; 3) расчет времени смешения по математической модели и производительности смесителя; 4) анализ полученных результатов (сопоставление рассчитанных и требуемых параметров смесителя, в частности, производительности, потребляемой мощности, габаритов и т.д.); 5) оптимизацию режимных и конструктивных параметров или корректировка исходных данных в зависимости от результатов проведенного анализа; 6) документальное оформление результатов расчета. Учитывая влияние многих факторов на интенсивность процесса смешения и получаемый результат, программа расчета построена в диалогом режиме, что позволяет оперативно вносить изменения в исходные данные и критерии, по которым проводится анализ полученных результатов. В программе предусмотрено использование готовых решений, хранящихся в базе данных, включая физико-механические свойства смешиваемых материалов и параметры идентификации.

В результате экспериментальных исследований выявлено, что для повышения эффективности однолопастного смесителя (сокращения времени смешения), необходимо осуществлять загрузку исходных компонентов в лопастной смеситель равномерно по длине смесителя и последовательно в порядке уменьшения размеров частиц и/или увеличения плотности материалов, из которых состоят компоненты. Известно, что процесс смешения в смесителе сыпучих материалов складывается из следующих элементарных одновременно протекающих процессов: 1) перемещение группы смежных частиц из одного места смеси в другое внедрением, скольжением слоев (процесс конвективного смешения – начальный (I) этап смешения); 2) постепенное перераспределение частиц различных компонентов через свежесформированную границу их раздела (процесс диффузионного смешения – заключительный (II) этап смешения); 3) сосредоточение частиц, имеющих одинаковую массу в соответствующих местах смесителя под действием гравитационных или инерционных сил (процесс сегрегации). Сократить время конвективного и диффузного процессов на соответствующих этапах смешения предлагается путем организации максимальной интенсивности различных видов перемещения частиц материала ("поршневого" и сдвигового) за счет изменения угла поворота рабочих органов и соответственно формы "застойной" зоны,

образующейся перед лопастями (рис. 2). Способ реализуется следующим образом: 1) для уменьшения пускового момента предусмотрен в начале процесса смешения угол поворота лопастей относительно оси вращения вала равный 90° (начинаем процесс с минимальной интенсивностью "поршневого" и сдвигового перемещения в течение определенного времени (3 ... 10 с)); 2) для организации равномерного переноса больших порций сыпучего материала (макрообъемов), т.е. максимальной интенсивности "поршневого" перемещения, угол поворота лопастей составляет 0° (уменьшение времени конвективного смешения (рис. 5, I-й этап) ($t_1 = (0,2 \dots 0,4) T$) происходит в этот момент за счет активного перемещения частиц сыпуче-

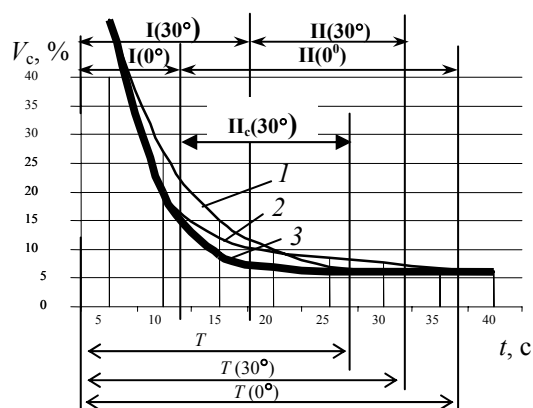


Рис. 5 Кинетические кривые процесса смешения семян люцерны и пшена в однолопастном смесителе при различных положениях лопастей:

1 – $\alpha = 30^\circ$; 2 – $\alpha = 0^\circ$;

3 – сочетание различных углов поворота

го материала блоками под воздействием клиновидного рабочего органа по всему объему смесителя (рис. 2, а)); 3) заканчивается процесс смешения при максимальной интенсивности сдвигового перемещения компонентов смеси, когда угол поворота лопастей находится в диапазоне от $\varphi_{ст}$ до α_k (период диффузного смешения (рис. 5, II-й этап) сокращается, так как интенсифицируется процесс перемещения микрообъемов частиц за счет увеличения перемещения частиц материала в потоках и площади его соприкасающихся поверхностей, обусловленное дополнительным эффектом смешения за счет движения частиц внутри "застойной" зоны (рис. 2, б)). Таким образом, предложенный способ и устройство для его осуществления обеспечивают стабильное достижение требуемого качества смеси и снижают время процесса смешения T на 15 ... 20 % по сравнению со смешением в одновальном лопастном смесителе с фиксированным положением лопастей, в котором возможна организация максимальной интенсивности лишь одного из видов перемещения: либо "поршневого", либо сдвигового.

Предложенный способ осуществляется в одновальном лопастном смесителе (рис. 6), имеющем возможность изменения угла поворота лопастей l относительно оси вращения вала за счет специального механизма, состоящего из штанги 2 и упоров 3, перемещающимися в радиальном направлении оси 4 лопастей l .

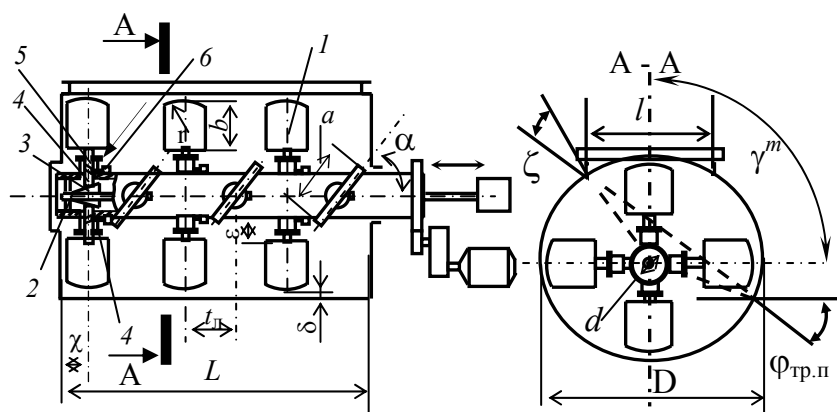


Рис. 6 Схема одновального лопастного смесителя

Поворот лопастей l при продольном перемещении штанги 2 осуществляется за счет винтовых канавок 5 осей 4 и штифтов 6. Лопастей l выполнены с закругленной формой кромки для обеспечения равномерного зазора по всей ширине лопасти между кромкой и внутренней поверхностью смесительной камеры в пределах допустимого диапазона 0,001 ... 0,003 м, радиус которой определяется из соотношения

$$r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{a_{ij_n}}{2}\right)^2} = \left(\frac{d}{2} + \varepsilon + \delta + b - h_b\right) - \sqrt{\left(\frac{d}{2} + \varepsilon + \delta + b - h_b\right)^2 - \left(\frac{a_{ij_n} \sin \alpha_{ij_n}}{2}\right)^2}$$

Результаты промышленных испытаний лопастного одновального смесителя с диаметром $D = 0,25$ м и длиной $L = 0,6$ м при производстве сухих концентратов натуральных напитков, компонентный состав которых включает в себя ряд сыпучих материалов, подтвердили, что предложенный способ приготовления смеси сыпучих материалов позволяет получить более стабильное качество смеси и снижение времени процесса смешения на 15 %. Методика расчета смесителя с использованием компьютерной программы принята к использованию при создании новой конструкции лопастного одновального смесителя, которым планируется оснастить расширяемое производство сухих концентратов натуральных напитков в рамках договора на 2003 г. между Межрегиональным научно-техническим центром (МНТЦ) "ПЧЕЛОПРОМ" и ТГТУ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 В результате комплексных исследований процесса смешения предложен способ приготовления смеси сыпучих материалов, усовершенствованная методика расчета и конструкция одновального лопастного смесителя, учитывающие эффект смешения за счет движения частиц внутри "застойной" зоны, которая образуется перед движущейся лопастью.

2 Исследовано влияние способа загрузки исходных компонентов на кинетику процесса смешения, позволившее определить смеситель с максимальной возможностью управления данным процессом.

3 В результате теоретического и экспериментального исследования обтекания пластины сыпучим материалом, используемой в качестве рабочего органа в одновальном лопастном смесителе, выявлен эффект смешения за счет движения частиц внутри "застойной" зоны, образующейся перед пластиной при определенных сочетаниях режимных и конструктивных параметров смесителя.

4 Предложенная физическая модель перемещения частиц материала в одновальном лопастном смесителе и зависимости для расчета величины этих перемещений позволили учесть характер поведе-

ния сыпучего материала, обусловленный образованием "застойной" зоны и зоны уплотнения перед лопастью.

5 Адекватность усовершенствованной математической модели процесса смешения, основанной на аппарате разрывных марковских процессов, подтверждена экспериментально.

6 На основе проведенных исследований и анализа результатов использования в промышленности даны рекомендации по проектированию рабочих органов, механизма загрузки/выгрузки и выбору режимных параметров однолопастного смесителя.

7 Предложенная методика расчета основных режимных и конструктивных параметров однолопастного смесителя позволяет проводить расчет новых, модернизацию существующих смесителей и прогнозировать качество смеси на промышленных установках.

8 Результаты промышленных испытаний предложенного способа приготовления смеси сыпучих материалов и устройства для его осуществления, разработанных на основе проведенных комплексных исследований, показали, что они обеспечивают стабильное достижение требуемого качества смеси и снижают время процесса смешения на 15 %.

Основные обозначения

W, v – скорость, м/с; K, K_u – экспериментальные коэффициенты; Γ_l – геометрические параметры лопасти, м; $\Gamma_{см}$ – геометрические параметры смесителя, м; Φ – физико-механические свойства смешиваемых компонентов; n – число оборотов вала, мин^{-1} ; α – угол поворота лопасти относительно оси вращения вала, град.; $i = 1 \dots k$ – номер ячейки смешения (ряда рабочих органов); $P_{ii}, P_{i(i+1)}, P_{i(i-1)}$ – вероятности перехода ключевого компонента; t, T – время смешения, с; ε – расстояние между внутренней кромкой лопасти и валом смесителя, м; δ – зазор между наружной кромкой лопасти и внутренней стенкой смесительной камеры, м; χ – расстояние от оси крайней лопасти до торца корпуса смесителя, м; $\varphi_{ст}$ – угол трения сыпучего материала на поверхности лопасти, град.; r – радиус скругления лопасти, м; $\varphi_{тр.п}$ – угол трения покоя сыпучего материала, град.; h_b – вылет лопасти, м.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1 Першин В. Ф., Пасько А. А., Демин О. В. Моделирование движения пластины в сыпучем материале // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8. – № 3. – С. 444–449.

2 Пасько А. А., Демин О. В. Моделирование движения потоков сыпучего материала при обтекании пластины // Математические методы в технике и технологиях: Сб. XV Междунар. науч. конф.: В 10-ти т. / Под общ. ред. В. С. Балакирева. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – Т. 10. – Секция 10. – С. 56–57.

3 Першин В. Ф., Демин О. В. Расчет однолопастного смесителя сыпучих материалов // Научно-технический прогресс в инженерной сфере АПК России – проблемы развития машинных технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции: Тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ВИМ, 2002. – Т. 142. – Ч. 2. – С. 18–23.

4 Демин О. В. Анализ работы различных видов смесителей сыпучих материалов периодического действия // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Вып. 8. – С. 109–114.

5 Демин О. В. Особенности приготовления многокомпонентных смесей в комбикормовом производстве // V научная конференция: Крат. тез. докл. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – С. 223.

6 Демин О. В. Способ и установка для приготовления смеси сыпучих материалов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – Вып. 11. – С. 58–62.

7 Демин О. В. Экспериментальное исследование процесса смешения сыпучих материалов в смесителях периодического действия // VI науч. конф.: Мат-лы конф. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – С. 204.

8 Демин О. В. Описание характера сыпучей массы при обтекании плоской пластины // VII науч. конф.: Мат-лы конф. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 115–116.

9 Демин О. В. Экспериментальное исследование перемещения частиц сыпучего материала в лопастном смесителе: Информ. листок № 70-036-01; Тамб. центр науч.-техн. информ. – Тамбов, 2001. – 2 с.

10 Демин О. В. Изучение механизма движения частиц при смешении сыпучих материалов в лопастном смесителе: Информ. листок № 70-038-01; Тамб. центр науч.-техн. информ. – Тамбов, 2001. – 4 с.

11 Демин О. В. Повышение качества и уменьшение затрат времени на смесеприготовление при производстве комбикормов: Информ. листок № 70-039-01; Тамб. центр науч.-техн. информ. – Тамбов, 2001. – 1 с.

12 Демин О. В. Определение затрат энергии в лопастных смесителях: Информ. листок № 70-044-01; Тамб. центр науч.-техн. информ. – Тамбов, 2001. – 3 с.

13 Демин О. В. Способ приготовления многокомпонентных смесей сыпучих материалов и установка для его осуществления: Информ. листок № 70-062-02; Тамб. центр науч.-техн. информации. – Тамбов, 2002. – 2 с.

14 Демин О. В. Способ повышения качества и уменьшения времени смесеприготовления в лопастных смесителях сыпучих материалов периодического действия: Информ. листок № 70-063-02; Тамб. центр науч.-техн. информации. – Тамбов, 2002. – 2 с.