

Александр Андреевич ГАРАБАЖИУ,
кандидат технических наук,
доцент кафедры "Машины
и аппараты химических
и силикатных производств"
Белорусского государственного
технологического университета

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУХИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СМЕСИТЕЛЕЙ

INTENSIFICATION OF MIXING PROCESSES OF DRY BULK MATERIALS IN MODERN MIXERS

В статье рассмотрены различные способы интенсификации процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей, составлена сводная таблица технико-экономической эффективности современного смесительного оборудования. На основании анализа достоинств и недостатков современных центробежных смесителей автором разработана принципиально новая конструкция энергосберегающего роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов, сделан вывод о перспективном промышленном использовании смесителей центробежного типа.

This article describes different methods of intensifying the process of mixing dry bulk materials in modern mixers. A summary table of the technical and economic efficiency of the modern mixing equipment was created. After analysing the advantages and disadvantages of the modern rotary mixers, the author has developed a fundamentally new design of energy-saving centrifugal rotary mixer for mixing dry bulk materials. The conclusion was made that the centrifugal rotary mixers could be widely used in industry.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время процесс приготовления однородных по составу смесей порошкообразных и зернистых материалов применяется во многих отраслях промышленности. Не является исключением в этом плане и промышленность строительных материалов. В технологических процессах производства большинства строительных материалов, а также цемента, сухих строительных смесей, фарфора, фаянса и т. д. смесительные аппараты занимают одно из ответственных мест. Во многих случаях процесс смешения является подчиненным, но, тем не менее, имеющим большое значение для основных технологических процессов и, в конечном счете, часто определяющим качество готовой продукции.

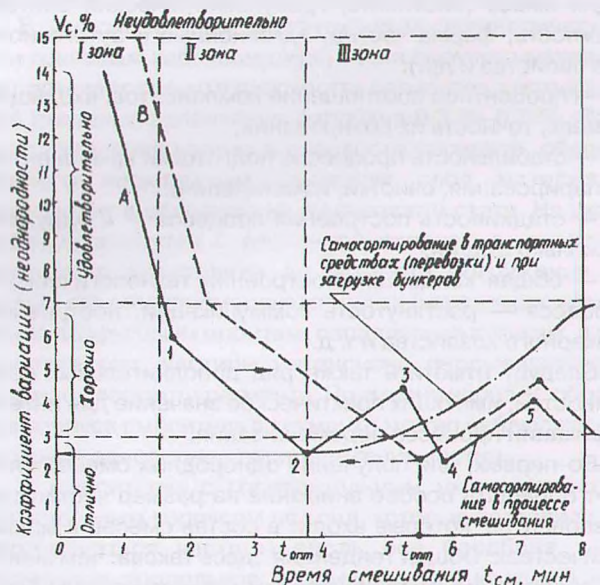
На современном этапе интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов при снижении их энергоемкости является актуальной задачей для многих предприятий по производству строительных материалов в Республике Беларусь. В большинстве случаев данная задача решается путем реконструкции или модернизации существующего смесительного оборудования, или же путем создания и внедрения новых высокоэффективных энергосберегающих машин и аппаратов.

ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И СПОСОБЫ СМЕШЕНИЯ СУХИХ МАТЕРИАЛОВ

Согласно исследованиям Ю. И. Макарова [1], механизм смешения сыпучих материалов складывается из следующих элементарных процессов: перемещение группы соседних частиц из одного положения в другое (конвективное смешение); перераспределение частиц через обновленную границу их раздела (диффузионное

смешение); скольжение плоскостей в массе материала (сдвиговое смешение); сосредоточение частиц, имеющих одинаковую массу, в соответствующих местах смесителя под действием гравитационных или инерционных сил (сегрегация).

На рис. 1 показана конфигурация "классической" кривой смешения, снятая при изучении работы тихоходных механических смесителей, на которой отчетливо видны все сингулярные точки (точки перегибов) 1–2–3–4–5,



- A — кривая смешения сухих компонентов;
- B — кривая смешения сухих компонентов с добавками жидкости;
- I — зона сдвигового и конвективного смешений;
- II — зона конвективного и диффузионного смешений;
- III — зона проявления самосортирования (сегрегации)

Рис. 1. Зависимость коэффициента вариации V_c от времени смешения $t_{см}$

обуславливающие вид кривой. Точка 2, соответствующая достижению первого минимального значения коэффициента неоднородности ($V_c \rightarrow \min$), отодвинута довольно далеко от начала координат. Сдвиговые и конвективные фазы процесса смешения идут достаточно долго, прежде чем процесс достигнет диффузионной стадии, при которой увеличивается степень свободы отдельных частиц. Направление их перемещения в каждый последующий момент становится непредсказуемым, напоминает броуновское движение. Именно в этой фазе, как следствие сказанного, начинает проявляться самосортирование (сегрегация) — частицы перемещаются под действием гравитационных и инерционных сил, что приводит к некоторому расслоению смеси. Однако степеней свободы у частиц все же недостаточно, и лопасти смесителя вновь увлекают частицы в конвективные и другие фазы смешения.

Рассматривая процесс смешения с позиции возможной интенсификации, следует стремиться сократить время "раскачки" компонентов в фазах сдвигового и конвективного смешения и прийти, как можно скорее, к диффузионному смешению и самосортированию, т. е. выйти по возможности быстрее на границу II и III зон (см. рис. 1). Это возможно за счет следующих факторов:

- разработки более эффективного профиля рабочих органов;
 - увеличения частоты вращения рабочих органов;
 - наложения вибрационных колебаний различной частоты, например, в вертикальной плоскости;
 - применения псевдоожижения;
 - применения магнитных и электрических полей;
 - применения в тихоходных смесителях дополнительных быстроходных мешалок для разрушения агрегатов частиц;
 - уменьшения мертвых зон в смесителе, правильного выбора коэффициента заполнения ванны смесителя и т. д.
- На ход, длительность и качество процесса смешения влияют многие факторы:
- физико-механические свойства частиц, составляющих смесь (плотность, гранулометрический состав, влажность, форма частиц, адгезионные и аутогезионные свойства и др.);
 - процентное соотношение компонентов, входящих в смесь, точность их дозирования;
 - стабильность процессов подготовки компонентов (сепарирования, очистки, измельчения);
 - стадийность построения процесса — в одну или несколько стадий;
 - общая концепция построения технологического процесса — растянутость коммуникаций, построение бункерного хозяйства и т. д.

Следует отметить также ряд дополнительных особенностей, имеющих практическое значение для интенсификации процесса перемешивания.

Во-первых, для получения однородных смесей следует обращать особое внимание на размер частиц тех компонентов, которые входят в состав смесей в малых количествах. Общая тенденция здесь такова: чем меньше содержание компонента, тем меньше должны быть размеры его частиц. Например, при распределении в 1 т известки компонента массой 1 кг размеры его частиц должны быть 500 мкм, массой 100 г — 200 мкм, 10 г — 100 мкм, а 1 г — менее 50 мкм.

Во-вторых, компоненты смеси можно перемешивать и малыми порциями, но несколько быстрее. Очевидно,

что равномерное распределение, например, 10 г сернокислого железа в 1 т смеси может наступить несколько быстрее, чем 50 г в 5 т.

В-третьих, удовлетворительного качества смеси можно достичь за несколько последовательных этапов перемешивания, например, при соотношении компонентов 1:1 000 000, за четыре этапа.

И наконец, при оценке качества смеси необходимо уметь идентифицировать (различать) ошибки, получаемые непосредственно в процессе смешивания и "доставшиеся" смесителю от предшествующей операции процесса дозирования. Результаты процесса дозирования, как известно, подчиняются законам теории вероятности, из чего следует, что при хорошо отлаженном процессе равновероятно появление ошибок как в плюсовую, так и в минусовую стороны, причем большие отклонения встречаются реже, чем малые. В целом характер ошибок может быть аппроксимирован нормальным законом распределения либо близким к нему.

В настоящее время основным качественным показателем процесса перемешивания является коэффициент вариации (неоднородности) смеси

$$V_c = \frac{100}{c} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - c)^2}, \quad (1)$$

- где c — среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента в пробах, %;
- c_i — значение концентрации ключевого компонента в i -й пробе;
- n — число проанализированных проб.

С учетом коэффициента вариации V_c оценочная шкала качества смешения выглядит следующим образом:

- $V_c < 3\%$ — отличное перемешивание;
- $V_c = (3-6)\%$ — хорошее перемешивание;
- $V_c = (7-15)\%$ — удовлетворительное перемешивание;
- $V_c > 15\%$ — неудовлетворительное перемешивание.

В настоящее время для перемешивания твердых сыпучих (порошкообразных) материалов применяются пневматический, гравитационный и механический способы.

Пневматический способ перемешивания осуществляется во взвешенном (псевдоожиженном) слое за счет прохождения потока воздуха или газа через слой смешиваемых компонентов.

Гравитационное перемешивание — посредством различных механических приспособлений (как правило, неподвижных), обеспечивающих перемещение твердого сыпучего материала в рабочем объеме смесителя, по более или менее сложным траекториям, под действием сил тяжести.

Механический способ перемешивания — посредством вращения в слое сыпучего материала различного рода приспособлений (мешалок, шнеков, лопастей, дисков, лент и т. д.), способствующих сложному (интенсивному) движению частиц материала в рабочем объеме смесителя. Данный способ перемешивания сыпучих материалов является наиболее распространенным в настоящее время.

Тот или иной способ перемешивания сыпучих материалов определяется в первую очередь конструктивными особенностями смесительного аппарата.

По характеру протекания технологического процесса различают периодическое и непрерывное смешение сыпучих материалов.

Периодический процесс отличается тем, что все смешиваемые компоненты одновременно (или в определенной последовательности) вводятся в замкнутый объем смесителя и подвергаются определенному рода воздействиям механических рабочих органов, насадок или газовой среды. Процесс смешения при этом продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое качество смеси. В данном случае решающее значение имеет время смешения, которое является необходимым (минимально достаточным) для обеспечения заданной однородности смеси.

В случае периодического смешения производительность смесительного аппарата зависит от времени смешения, времени загрузки, пуска, остановки и выгрузки смеси. Время смешения определяется не только объемом смесителя, конструкцией рабочих органов, скоростью вращения, свойствами смешиваемых компонентов, но и в значительной степени зависит от первоначальной ориентации поверхностей раздела компонентов и порядка заполнения ими объема смесителя. Размещение компонентов должно обеспечивать максимальную скорость увеличения числа поверхностей раздела компонентов. Периодическая переориентация материала в смесителе в процессе смешения уменьшает основное время смешения.

При *непрерывном процессе смешения* подача сыпучего материала в рабочий объем смесителя так же, как и его выгрузка, осуществляется непрерывно. При этом заданное качество смеси, как правило, достигается за один ее проход через рабочую полость смесителя. При работе смесителя непрерывного действия соотношение компонентов смеси, вводимых в него с одинаковой скоростью, в каждой пробе определенного объема на выходе из системы должно быть достаточно близким к соотношению компонентов в смеси в целом. То есть основной целью процесса непрерывного смешения является снижение резкого варьирования концентраций компонентов смеси до заданного минимума на выходе из смесителя. При этом так же, как и в случае периодического смешения, поверхности раздела компонентов смеси должны пересекаться с их линиями тока в смесителе [2].

Современное оборудование для смешения сыпучих материалов можно классифицировать по одному из следующих признаков:

- по способу его установки (передвижное или стационарное);
- по характеру протекающего в нем процесса смешения (периодического или непрерывного действия);
- по скорости вращения перемешивающего органа (тихоходное или быстроходное);
- по механизму процесса смешения (конвективного, диффузионного или конвективно-диффузионного смешения);
- по способу воздействия на смесь (гравитационное, центробежное или продуваемое);
- по виду перемещения потока частиц (циркуляционное или с хаотическим перемещением частиц);
- по конструктивному признаку (с вращающимся корпусом, со стационарным корпусом и вращающимся перемешивающим органом, с вертикальным или горизонтальным валом; червячные, лопастные, дисковые агрегаты и т. п.);
- по способу разгрузки (с ручной или механизированной разгрузкой);
- по способу управления (с ручным или автоматическим управлением).

На практике каждый из этих признаков может быть использован для классификации смесителей. Причем в качестве основного признака может быть принят тот, который для данных конкретных условий эксплуатации, расчета, моделирования или конструирования смесителя является наиболее важным. По этой причине один и тот же смеситель может быть причислен к различным группам в зависимости от определяющего классификационного признака [1, 3].

Рассмотрим подробнее современные конструкции смесительного оборудования для переработки сухих сыпучих материалов.

БАРАБАННЫЕ СМЕСИТЕЛИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ КОРПУСОМ

В настоящее время смесители с вращающимся корпусом наиболее широко применяются для перемешивания различных видов сыпучих материалов и усреднения партий гранулированных и порошкообразных материалов, смешения гранулята с порошкообразными стабилизирующими добавками и т. д. Смешение компонентов смеси происходит за счет пересыпания материала при вращении корпуса под действием гравитационных сил. Смесители с вращающимся корпусом могут работать как в периодическом, так и непрерывном режимах.

Барабанные смесители различаются формой корпуса и его расположением по отношению к оси вращения. Известны следующие типы барабанных смесителей, применяемые в промышленности: цилиндрический с горизонтальной или вертикальной осью вращения; биконический с горизонтальной или вертикальной осью вращения; граненый с горизонтальной осью вращения; билиндрический или V-образный; кубический; тетраэдрический; цилиндрический с наклоненной осью вращения или "пьяная бочка" [1].

Барабанные смесители относятся к тихоходным машинам, частота вращения барабана которых обычно составляет 4–10 об/мин и зависит от типа смесителя и физико-механических свойств смешиваемых материалов.

В смесителях с горизонтальным цилиндрическим или граненым корпусом циркуляция сыпучего материала протекает только в плоскостях сегментов с оптимальной степенью заполнения барабана 0,3 %–0,7 %. Процесс смешения частиц в плоскости сегмента, образованного нормальным сечением слоя материала, происходит в основном на поверхности ската. На скате частицы движутся с различной скоростью, проходят различные расстояния до момента погружения их в слой, где они перемещаются почти без перераспределения по круговым орбитам, параллельно стенкам, в результате чего частицы интенсивно перемешиваются только в плоскости сегмента. Примерно через 10 оборотов корпуса смесителя в сегменте можно наблюдать достаточно однородное распределение частиц.

В смесителях с горизонтальным цилиндрическим или граненым корпусом нет сил, которые заставили бы перемещаться частицы вдоль оси барабана, хотя медленное продольное перемешивание частиц в нем все же присутствует. При этом наиболее интенсивное смешение достигается в барабанах шестигранной формы, которые одновременно с этим обладают и определенным измельчающим действием.

Для интенсификации продольных перемещений частиц материала в цилиндрических смесителях

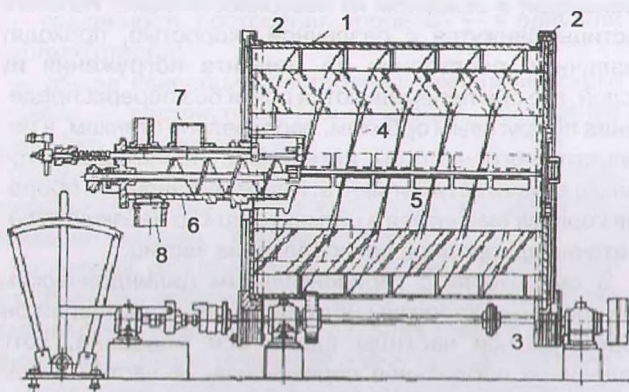
с горизонтальной осью вращения, внутри их корпуса дополнительно монтируются специальные устройства (спиральные ленты, полки, лопатки и т. п.).

Подобная конструкция барабанного смесителя представлена на рис. 2. Данный смеситель состоит из горизонтального цилиндрического барабана 1, внутри которого по боковой поверхности укреплены спиральные косые перегородки 4 и ряд наклонных лопаток 5. Витки спирали 4 при вращении корпуса перемещают материал в одну сторону, а наклонные лопатки 5 перебрасывают его в другую. Такое внутреннее устройство способствует перемещению частиц материала вдоль оси вращения, что при наличии их перераспределения в плоскостях, нормальных к оси вращения, обеспечивает смешение материала во всем объеме смесителя. Смесь загружают и выгружают соответственно через люки 7 и 8 с помощью шнека 6 без остановки смесителя. После окончания операции смешения для выгрузки готового продукта шнек вращают в обратную сторону, при этом продукт со стенок корпуса смесителя ссыпается в корыто шнека, откуда транспортируется через люк 8 в приемную тару. Корпус смесителя с бандажми 2 вращается на опорных роликах 3. Однако качество смешения сыпучих материалов (коэффициент неоднородности) в данном смесителе неудовлетворительное и составляет $V_c = (10-15) \%$.

Для еще большей интенсификации процесса смешения в горизонтальных смесителях внутри их корпуса дополнительно монтируются различного рода вращающиеся устройства (быстровращающийся вал с лопастями, шнек и т. п.). Коэффициент неоднородности готовой смеси после обработки в подобных смесителях составляет 8 %–12 %.

В барабанных смесителях с биконическим, бицилиндрическим, кубическим, тетраэдрическим и наклонным корпусом осевые перемещения частиц осуществляются за счет скольжения материала по наклонным поверхностям их корпуса. В них даже без специальных внутренних устройств возможно удовлетворительное смешение компонентов во всем объеме корпуса. Материал частиц перераспределяется в таких смесителях в основном за счет среза слоев, их перетасовки, поэтому для них нельзя использовать диффузионную модель процесса смешения.

Согласно исследованиям ВНИИПТХИММАШа было установлено, что наиболее эффективными среди бара-



1 — корпус; 2 — бандаж; 3 — опорный ролик;
4 — спиральная перегородка;
5 — наклонная лопатка; 6 — шнек;
7 — люк для загрузки смеси; 8 — люк для выгрузки смеси

Рис. 2. Барабанный смеситель с горизонтальным цилиндрическим корпусом

банных смесителей являются тетраэдрические и бицилиндрические (V-образные) [1, 3].

Бицилиндрические смесители в основном состоят из приваренных друг к другу под некоторым углом двух цилиндрических барабанов. Свободные концы цилиндров закрыты крышками, в которых монтируются загрузочные и разгрузочные штуцера. При разработке новых конструкций бицилиндрических смесителей также стремятся как-то интенсифицировать процесс смешения, устанавливая внутри них вращающиеся элементы (рамы, лопастные валы и т. д.).

Примеры новых конструктивных разработок барабанных смесителей приведены в [4–7].

К достоинствам барабанных смесителей относятся: простоту конструкции и техобслуживания; возможность смешения компонентов без истирания и разрушения формы зерна; возможность при отсутствии внутренних вращающихся элементов смешивать абразивные компоненты; возможность полной герметизации.

Недостатки барабанных смесителей: неудовлетворительное качество смешения; длительный цикл смешения, исчисляемый часами; возможность налипания порошковых материалов на стенки корпуса; большая металлоемкость и износ корпуса; значительные нагрузки на опорные узлы аппарата; большие энергозатраты на единицу готовой смеси. Поэтому смесители с вращающимся корпусом с экономической точки зрения целесообразно применять только для смешения больших объемов сыпучей смеси, что позволяет снизить энергозатраты и время перемешивания на единицу объема приготавливаемой смеси.

ЧЕРВЯЧНО-ЛОПАСТНЫЕ СМЕСИТЕЛИ

Червячно-лопастные смесители относятся к универсальным смесительным машинам. В них можно смешивать как увлажненные материалы и пасты, так и сухие сыпучие материалы или волокнистые вещества. Так, например, в производстве пресс-порошков в настоящее время используются одно- и двухваловые горизонтальные смесители периодического и непрерывного действия, в которых компоненты смешиваются при помощи двух роторов, вращающихся с различными скоростями. Червячно-лопастные смесители изготавливаются с одним или, в большинстве случаев, с двумя роторами, которые могут располагаться как вертикально, так и горизонтально. В зависимости от физико-механических свойств смешиваемых компонентов и технологических условий процесса, конструктивное оформление роторов червячно-лопастных смесителей может быть различным: в виде вала с фасонными, плоскими, изогнутыми или лемехообразными лопастями; в виде вала с узкими металлическими лентами или скрученными полосами; в виде шнека или червяка и т. п.

В настоящее время для приготовления композиции из сыпучих материалов с небольшими добавками жидкости, а также для смешения сыпучих материалов с коротковолокнистыми компонентами или сыпучих материалов с большой липкостью применяются однороторные плунжерные смесители, у которых в процессе смешения происходит самопроизвольная очистка смесительных элементов и внутренних стенок корпуса.

В смесителях данного типа, при вращении горизонтального ротора с плунжерными лопастями, исходные компоненты смеси приводятся лемехами

плужков в движение от стенок корпуса аппарата к его оси по сложной траектории. Частицы, движущиеся от одного лемеха, попадают под действие другого, меняя при этом траекторию своего движения. За счет этого происходит интенсивное перераспределение частиц материала по объему смесителя. Однако из-за отсутствия общей направленной циркуляции материала в данном аппарате требуются значительные затраты времени (2–4 часа) для того, чтобы перераспределить частицы компонентов исходной смеси к торцовым стенкам корпуса. Для самоочистки лопастей ротора и внутренних стенок корпуса смесителя зазор между данными элементами аппарата выставляется не более 1–2 мм [1].

Тем не менее, порошкообразные композиции эластомеров наиболее целесообразно смешивать в аппаратах червячно-лопастного типа. Исследования В. П. Исаевым [8] процесса смешения порошкообразных композиций в смесителях плунжерного типа (с многокрыльчатыми лемехообразными лопастями) показали, что расход энергии для приготовления смеси заданного качества существенно ниже по сравнению с традиционными схемами, а эффективность смешения компонентов определяется размерами частиц каучука, его фракционным составом, степенью заполнения свободного объема смесителя и скоростью его рабочих органов.

Основным рабочим (смесительным) органом однороторного ленточного смесителя является вращающийся в цилиндрическом или корытообразном корпусе вал, на котором смонтированы стержни с укрепленными на их вершинах узкими металлическими лентами или скрученными полосами, изогнутыми по винтовому линиям. Корпус однороторного ленточного смесителя обычно имеет плоские торцовые стенки и съемную плоскую крышку. Исходные компоненты смеси загружаются через соответствующие штуцера в верхней крышке аппарата, а готовая смесь разгружается через штуцер в днище корыта. Если емкость ленточного смесителя большая, то его смесительный элемент обычно выполняется из четырех лент. Две наружные ленты перемещают материал к центру корпуса смесителя, а две внутренние возвращают его к торцовым стенкам аппарата.

Перераспределение частиц исходных компонентов смеси в однороторном ленточном смесителе происходит вследствие противоположного перемещения материала под действием лент. Частицы сыпучего материала, поднимаемые лентами с одного места, внедряются в смесь в другом месте. Однако здесь следует отметить, что способность винтовых лент транспортировать сыпучий материал в осевом направлении смесителя крайне ограничена. Вследствие этого удовлетворительное качество смешения в ленточных смесителях достигается за сравнительно длительный период времени (1–3 часа).

При смешении увлажненных или уплотняющихся материалов на лентах жестко прикрепляют дополнительные стержни, разрыхляющие перемешиваемую массу. В этом случае с целью лучшей очистки корпуса смесителя зазор между наружными кромками лент и внутренней поверхностью корпуса аппарата выставляют не более 1–2 мм [3].

Смесители с рабочими органами шнекового (червячного) и лопастного типов применяют главным образом при работе с сыпучими материалами, склонными к слеживанию и агрегатированию, а также в том случае, если качество смеси, получаемой в смесителях с вращающимся корпусом, не удовлетворяет требованиям техно-

логии. Корпус аппаратов этого типа неподвижен, а приготовление смеси производится вращающимися мешалками. В данных аппаратах наряду с гравитационной имеет место принудительная циркуляция материала, что позволяет повысить качество получаемой композиции и сократить время на ее приготовление.

В червячных машинах, предназначенных для перемешивания порошкообразных и гранулированных материалов, червяки выполняются однозаходными с увеличенным (по сравнению с многозаходными) объемом канала, что особенно важно в зоне загрузки червяка.

Интенсифицировать процесс смешения в рабочем канале обычного однороторного червячного (шнекового) смесителя можно за счет нарезки дополнительных винтовых канавок на внутренней поверхности корпуса (это обеспечивает дополнительную продольную циркуляцию продукта по объему машины). Однако использование такой конструкции приводит к необходимости увеличивать время пребывания исходных материалов в смесителе. Кроме того, следует указать на трудоемкость операций нарезания и полирования винтовых канавок внутри корпуса.

В некоторых конструкциях однороторных смесителей для осуществления продольных циркуляций компонентов смеси внутреннюю поверхность корпуса машины выполняют в виде многогранника или эксцентрично по отношению к оси шнека или червяка. Однако в таких машинах возможен проскок неомогенизированных агломератов от входа к выходу смесителя.

Для интенсификации процесса смешения в одноименной зоне по окружности шнека (червяка) с определенным интервалом могут быть установлены несколько рядов пальцев или штифтов, а также участков с обратной прерывистой нарезкой. Использование для интенсификации процесса смешения насадок в виде роликов, установленных в горизонтальных пазах наконечника шнека (червяка), и шариков, перемещающихся по замкнутому наклонному пазу машины, менее предпочтительно. Такая конструкция смесителя сложна и недостаточно эффективна [2].

До недавнего времени широкое распространение в промышленности получили двухроторные червячно-лопастные смесители с реверсивным шнеком. Отличительной особенностью этого типа смесителя от обычных двухроторных аппаратов является наличие реверсивного шнека, предназначенного для интенсификации процесса смешения, механизации разгрузки готовой смеси, а также, при необходимости, для формования из пастообразной смеси профильных изделий. Эти смесители можно применять для следующих технологических процессов: смешение сыпучих материалов; смешение твердых веществ с жидкостями для получения однородных паст, мазю; смешение порошкообразных масс с жидкостями для увлажнения частиц порошка; нагревание или охлаждение твердых и густых масс при интенсивном перемешивании; окрашивание материала, получение клеев.

Двухроторный червячно-лопастный смеситель с реверсивным шнеком (рис. 3) состоит из следующих конструктивных элементов: камеры смешения 1 — с крышкой 2, двух роторов 3 с Z-образными лопастями, реверсивного шнека 4, привода роторов 5, привода шнека 6 и станины 7. Торцовые стенки камеры смешения 1 — съемные, на их наружной стороне закрепляются корпуса сальниковых уплотнений роторов 3 и шнека 4, подшипниковые узлы, а на передней стенке, кроме этого,

крепится также патрубок выгрузки смеси из шнека. Боковая поверхность камеры может быть снабжена рубашкой для нагрева или охлаждения перемешиваемой массы или быть без рубашки. Реверсивный шнек 4 располагается в месте сопряжения двух полуцилиндров корытообразного корпуса 1, под лопастями роторов 3.

Смеситель работает следующим образом. В камеру смешения 1 через соответствующие патрубки в крышке 2 загружают необходимое количество исходных сыпучих и, при необходимости, жидких компонентов, а затем включают в действие лопасти ротора 3 и шнек 4. В процессе работы смесителя лопасти ротора 3 вращаются навстречу друг другу с различной частотой и перемешивают исходные компоненты смеси. Навивка лопастей 3 имеет такое направление, что траектории движения их наружных частей не пересекаются друг с другом и за счет этого смесь перемещается от периферии к центру корыта 1. Одновременно с этим шнек 4 транспортирует смесь по направлению к задней торцевой стенке камеры 1. Далее шнек 4 сбрасывает массу на быстроходную лопасть ротора 3. Это приводит к значительной интенсификации процесса смешения исходных компонентов. Готовая смесь, подаваемая лопастями 3, может выгружаться через формующий наконечник, установленный на выходе разгрузочного патрубка шнека 4 [1, 3].

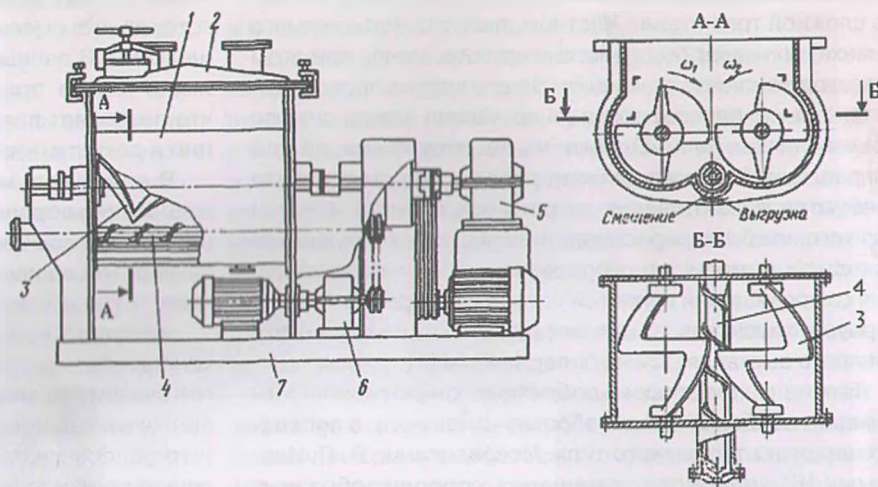
Примеры новых конструктивных разработок червячно-лопастных смесителей приведены в [9–12].

К достоинствам червячно-лопастных смесителей относятся: универсальность использования (для смешения увлажненных материалов и паст, сухих сыпучих материалов, волокнистых веществ и т. д.); возможность совмещать процесс смешения с другими технологическими операциями (например, с подогревом или охлаждением порошков полимеров, с плавлением и гомогенизацией полимеров, с пластикацией и диспергированием композиций полимера с различными добавками и т. д.); самопроизвольное очищение смесительных рабочих органов и корпуса аппарата.

Недостатки червячно-лопастных смесителей: неудовлетворительное качество смешения; длительный цикл смешения, исчисляемый часами; существенный износ смесительных рабочих органов; большое количество сальниковых уплотнений; сравнительно малый полезный объем аппарата; относительно большая металлоемкость; значительные энергозатраты на единицу готовой смеси.

БИПЛАНЕТАРНЫЕ СМЕСИТЕЛИ

В последние годы широкое распространение получили бипланетарные смесители, в которых помимо вращения вокруг собственной оси червячный (шнековый) рабочий орган совершает дополнительные перемещения по окружностям. Разработка конструкций планетарных смесителей привела к созданию аппаратов, в которых перемешивающий орган совершает сложное движение по различным трохоидальным кривым.



1 — корытообразный корпус; 2 — крышка; 3 — ротор с Z-образными лопастями; 4 — реверсивный шнек; 5 — привод роторов; 6 — привод шнека; 7 — станина

Рис. 3. Двухроторный червячно-лопастной смеситель с реверсивным шнеком

Смесители с трохоидальным движением червячных мешалок имеют ряд *преимуществ* по сравнению с аппаратами других типов: в перемешиваемом объеме отсутствуют мертвые зоны; обеспечен принудительный перенос перемешиваемых материалов в радиальном, тангенциальном, а в некоторых конструкциях и в осевом направлениях в любых соотношениях; возможно применение перемешивающих устройств малых диаметров по сравнению с диаметром корпуса аппарата, так как мешалки за счет сложного движения поочередно находятся во всех зонах аппарата, воздействуя таким образом на весь перемешиваемый объем независимо от геометрических размеров. Эти основные особенности аппаратов обеспечивают при сравнительно небольших затратах электроэнергии высокую производительность смесителей при хорошем качестве готовой продукции.

Определяющий фактор процесса перемешивания в смесителях с циклоидальным движением мешалок — конвективный перенос частиц, поэтому данные аппараты можно применять для приготовления смесей, склонных к сегрегации. Наиболее целесообразно такие смесители использовать при введении малых добавок в большие объемы смеси.

Воспроизведение трохоидальных траекторий в промышленных аппаратах наиболее просто осуществляется путем установки между двигателями и рабочими органами смесителя бипланетарных (зубчато-рычажных) механизмов. По аналогии с планетарными такие смесители предложено называть бипланетарными.

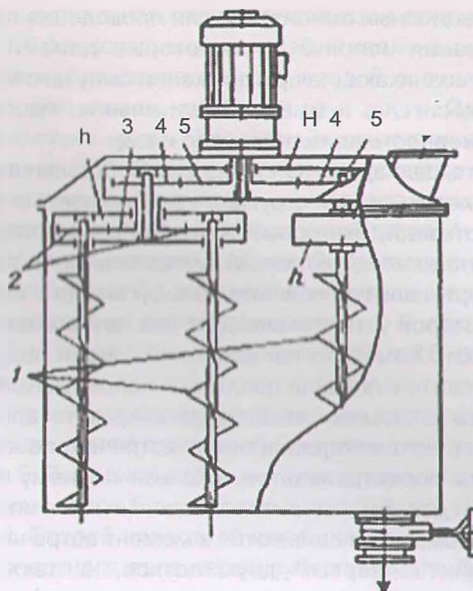
По характеру режима работы мешалок бипланетарные смесители (БС) подразделяются на два класса БСП и БСА. Класс БСП объединяет смесители с принудительным режимом работы мешалок. Законы движения мешалок аппаратов этого класса полностью определяются на стадии проектирования аппарата и зависят от конструкции привода, числа входных звеньев, связанных с электродвигателями, величины и направления угловых скоростей входных звеньев. При этом смесители могут работать либо по постоянной программе в течение всего периода перемешивания, либо по переменной программе, изменяемой оператором или автоматом в процессе перемешивания в зависимости от требований технологического процесса.

Мешалки БСП движутся по циклоидальным траекториям с мгновенной линейной скоростью и с одновременным вращением вокруг собственных осей. В схеме перемешивающего устройства бипланетарных смесителей заложены большие возможности для интенсификации процессов перемешивания любых материалов, особенно высоковязких, пастообразных и сыпучих сред.

Класс БСА объединяет смесители с адаптивным (самонастраивающимся) режимом работы мешалок. Законы движения перемешивающих органов аппаратов этого класса не могут быть полностью определены на стадии проектирования. Характер движения мешалок при заданной структурной схеме бипланетарного привода определяется сопротивлением перемешиваемой среды. Изменение физико-механических свойств перемешиваемых материалов в ходе технологического процесса или возникновение случайных локальных зон повышенного сопротивления приводит к изменению вида траекторий и частоты вращения мешалок. Таким образом, у аппаратов класса БСА существует обратная связь между физико-механическими свойствами среды и режимом работы смесителя, т. е. аппараты обладают свойством частичной адаптации, позволяющим приводу реагировать на изменение условий проведения технологического процесса и осуществлять саморегулировку кинематических параметров движения мешалок. Следовательно, отличительная особенность смесителей БСА — возможность получения различных режимов работы при постоянной конструкции привода с одним входным звеном и при неизменной частоте вращения вала электродвигателя. Конкретный закон движения мешалок устанавливается автоматически в соответствии с возникающим при перемешивании сопротивлением массы.

На рис. 4 представлена схема смесителя БСП. Бипланетарный смеситель снабжен цилиндрическим корпусом с плоским днищем и крышкой, на которой установлен электродвигатель. Валы червячных мешалок соединены с валом электродвигателя посредством бипланетарного (зубчато-рычажного) механизма, состоящего из первой (планетарной) и второй (бипланетарной) ступеней. В первую ступень входят поводок H , неподвижное центральное зубчатое колесо 5 и сателлиты 4. Во вторую ступень входят два (или больше) поводка h , валы которых служат валами сателлитов 4, центральные колеса 3, жестко закрепленные на поводке H , и сателлиты 2. Валы сателлитов 2 являются также и валами мешалок 1. В смесителе имеются загрузочный бункер и выгрузочное устройство.

Работает аппарат следующим образом. При включении электродвигателя движение передается на поводок H , который, вращаясь, обкатывает вокруг центрального неподвижного зубчатого колеса валы сателлитов 4. Сателлиты 4 находятся в зацеплении с колесом 5, а валы сателлитов 4 шарнирно закреплены на поводке H . Такое сочленение конструктивных элементов обеспечивает сателлитам 4 планетарное движение, т. е. вращаясь вокруг собственных осей, они вращаются также и вместе с поводком H . Так как каждый из сателлитов 4 и соответствующий ему поводок h образуют одно звено, то поводки приобретают движение, полностью совпадающее по параметрам с движением сателлитов 4. Вращаясь вокруг собственной оси, поводки h обкатывают вокруг центральных колес 3 валы сателлитов 2 второй ступени бипланетарного механизма. Сателлиты 2 находятся в зацеплении с колесами 3. Валы сателлитов 2 шарнирно



1 — червячная мешалка; 2, 4 — сателлит;
3, 5 — центральное зубчатое колесо;
 h, H — поводка

Рис. 4. Схема бипланетарного смесителя БСП

но закреплены на соответствующих поводках h . Таким образом, сателлиты 2 вращаются вокруг собственных осей, и, кроме того, вращаются вместе с поводками h . Так как каждый из сателлитов 2 и соответствующие им мешалки представляют одно звено, то параметры движения этих мешалок аналогичны параметрам движения сателлитов 2 второй ступени. В результате мешалки бипланетарных смесителей вращаются вокруг собственной оси, вокруг оси поводка h второй ступени и вокруг оси поводка H первой ступени.

Экспериментальные исследования бипланетарных смесителей БСП и БСА показали, что практически для всех исследуемых режимов работы и геометрических параметров мешалок высокое качество перемешивания готовой смеси ($V_c = (1,5-5,0) \%$) достигается через 3–5 мин, что обеспечивает высокую производительность данных аппаратов [13].

Примеры новых конструктивных разработок планетарных смесителей приведены в [14, 15].

К недостаткам бипланетарных смесителей следует отнести: сложность конструкции (особенно привода мешалок); трудоемкость проектирования и техобслуживания; сложность организации движения перемешивающих органов во всем объеме аппарата по различным трохоидальным кривым; сложность пусконаладочных работ особенно для аппаратов с адаптивным (самонастраивающимся) режимом работы мешалок; значительные нагрузки на подшипниковые узлы и перемешивающие органы аппарата в процессе работы.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ СМЕСИТЕЛИ

В большинстве современных промышленных смесителей процесс перемешивания сыпучих материалов происходит под воздействием различного рода механических вращающихся устройств, требующих значительных затрат энергии и сложных конструкций приводов. В отличие от них в гравитационных смесителях отсутствуют вращающиеся побудители процесса, и исходные компоненты смеси смешиваются в результате движения сыпучего материала под действием сил тяжести.

В гравитационных смесителях для проведения процесса смешения используют некоторые динамические явления, возникающие при движении сыпучего материала в смесителе, а именно: распыление, наложение, неравномерность движения, удар и т. д.

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие конструкции гравитационных смесителей: лотковый, бункерный и ударно-распылительный.

Гравитационный лотковый смеситель представляет собой вертикальную колонну прямоугольного сечения, внутри которой установлены друг над другом наклонные лотки. Компоненты исходной смеси подаются в смеситель при помощи дозаторов непрерывным потоком через специальные штуцера в крышке аппарата. Струя сыпучего материала после встречи с поверхностью лотка перестраивается, скользя по нему тонким слоем. В данном смесителе отдельные компоненты исходной смеси смешиваются в момент встречи слоев, стекающих с первых двух лотков, а также при неравномерном их движении по поверхности по следующим лоткам и поросыпании с лотка на лоток.

В гравитационном бункерном смесителе созданы несколько лучшие условия для порораспределения частиц, нежели в лотковом смесителе. Конструктивно он представляет собой цилиндрическую колонну, внутри которой соосно закреплены друг над другом пять или шесть конических днищ с выпускными отверстиями. Таким образом, каждое коническое днище с частью цилиндрического корпуса колонны представляет собой бункер. Диаметр выпускных отверстий в днищах подбирается с таким расчетом, чтобы в бункерах создавался определенный запас сыпучего материала.

Принцип смешения сыпучих материалов в бункерах без специальных перемешивающих устройств основывается на следующем явлении, наблюдаемом при выпуске сыпучих материалов через нижние отверстия бункеров. Основная масса материала движется через бункер подобно сплошному стержню, без перемещения частиц друг относительно друга. Только в пристенном слое толщиной, равной двух- или трехкратному размеру средней частицы сыпучего материала, скорость движения частиц приблизительно на 10 % меньше, чем в центральной части бункера. Подобное движение сыпучей массы наблюдается в той части бункера, которая расположена выше выпускаемого отверстия на расстоянии больше двух диаметров бункера. В нижней же части бункера неравномерность движения частиц материала становится наиболее заметной и наблюдается по всему сечению бункера [16, 17].

В результате этого явления у выпускного отверстия бункера возможна встреча частиц, расположенных в верхней части бункера на разных уровнях, что является элементарным актом смешения. Если выгружаемый из нижнего отверстия бункера сыпучий материал снова возвращать в бункер, то после нескольких подобных проходов он может быть достаточно хорошо перемешан.

В гравитационном ударно-распылительном смесителе (рис. 5) поступающие из дозаторов через штуцера 1 компоненты смеси последовательно проходят тонкими слоями по наклонным лоткам 2. Смешиваемые компоненты накладываются на нижнем лотке один на другой, что исключает возможность сосредоточения одного из них в каком-то месте верхнего бункера первой секции смесителя. Каждая секция смесителя состоит из цилиндрической обечайки 3, конического днища 4 с центральным отверстием, шибера 5

и ударно-распылительного наконечника 6. Выходящая из нижнего выпускного отверстия бункера струя свободно падающего материала встречает на своем пути наконечник 6. При ударе о наконечник струя распыляется, в результате чего образуется факел из твердых частиц в форме полого параболаоида вращения. Оседающие из факела частицы падают на слой материала, находящийся в бункере последующей секции смесителя. Подобный процесс опускания частиц в бункере, истечения их из отверстия, последующего распыливания и оседания повторяется на каждой секции смесителя. Перераспределение частиц отдельных компонентов смеси происходит как во время их движения через бункер, так и в распылительных факелах.

Чтобы струя сыпучего материала, вытекающая из отверстия конического днища 4, была устойчивой, необходимо иметь в бункерах каждой секции смесителя определенный его запас. Этого можно добиться в результате изменения величины выпускного отверстия бункера при помощи шибера 5. При запуске смесителя в работу каждый шибер 5, начиная с верхнего, открывается последовательно с некоторым промежутком времени, достаточным для создания определенного запаса материала в лежащем выше бункере [1, 3].

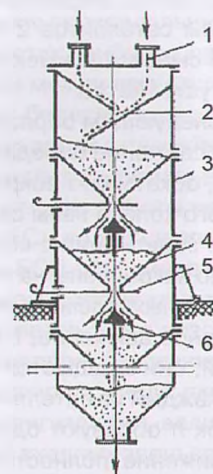
В лотковом, бункерном и ударно-распылительном гравитационных смесителях можно смешивать только хорошо сыпучие материалы.

К достоинствам гравитационных смесителей относятся: простота конструкции и техобслуживания; отсутствие движущихся рабочих органов (побудителей смешения); низкие энергозатраты на единицу готовой смеси.

Недостатки гравитационных смесителей: удовлетворительное качество смешения; необходимость точного дозирования исходных компонентов смеси из-за низкой сглаживающей способности смесителей; возможность зависания смеси при переходе ее из одной секции в другую; относительно большие габаритные размеры (высота); возможность смешения только хорошо сыпучих материалов.

ВИБРАЦИОННЫЕ СМЕСИТЕЛИ

Смесители данного типа предназначены для интенсификации процессов перемешивания сыпучих, жидких и пластичных материалов.



1 — загрузочный штуцер; 2 — наклонный лоток; 3 — цилиндрическая обечайка; 4 — коническое днище; 5 — шибер; 6 — ударно-распылительный наконечник

Рис. 5. Схема гравитационного ударно-распылительного смесителя

Согласно исследованиям В. Л. Арефьева [18, 19], при использовании вибрации эффективность технологических процессов резко повышается, сокращается время достижения максимальной однородности структуры при одновременном значительном снижении затрат энергии на перемешивание. При этом наиболее эффективной формой механических воздействий являются периодические механические колебания массы, которые позволяют коренным образом изменить характер процесса структурообразования, значительно улучшить качество получаемых смесей.

Особенность работы любого вибросмесителя заключается в том, что в нем при поступательном движении источника колебаний по круговой или эллиптической траектории частицы смеси, непосредственно соприкасающиеся с источником колебаний, периодически получают ударный импульс, поглощая определенную долю подведенной энергии вибратора. В свою очередь частицы граничного слоя в процессе движения передают импульс и энергию более отдаленным соседним слоям, благодаря чему при вибрации по смеси распространяются волны, источником которых является вибрирующая поверхность. Это вызывает интенсивные колебания частиц и их циркуляцию.

При воздействии вибрации создаются условия для предельного или близкого к нему снижения вязкости смеси, ускорения процессов смешения и контактирования максимального количества частиц. При этом изменяются не только реологические свойства, но и сам характер процесса формирования структуры смесей.

Наиболее эффективно колебания воздействуют на слои дисперсной системы, соприкасающиеся с вибрирующей поверхностью, так как по мере передачи энергии от слоя к слою величина импульсов уменьшается вследствие диссипации энергии в объеме системы.

Для обеспечения объемного вибрационного перемешивания рабочая камера вибросмесителя должна быть минимально возможного диаметра с максимально развитой поверхностью, передающей вибрацию [20].

Все вибросмесители можно условно разделить на две группы: циркуляционные и активационные. К первой группе относятся все смесители, в которых вибрация направлена на создание циркуляции смешиваемого материала (например, вибромельница, трубные вибросмесители, смесители Гипростройиндустрии ОБ-2, ВНИИНСМ (Всесоюзный научно-исследовательский институт новых строительных материалов) ДВС и др.). Ко второй группе относятся смесители, в которых вибрация не вызывает циркуляцию материала, а предназначена для "активации" проходящего в них процесса (например, виброрастворомешалки, бетономешалки и т. п.). Первая группа смесителей отличается большими амплитудами (3–4 мм против 0,3–0,5 мм в смесителях второй группы) и относительно малыми частотами колебаний (1,5–2,0 тысячи колебаний в минуту против 3–12 тысяч колебаний в минуту в смесителях второй группы).

Большинство вибросмесителей предназначено для смешения сухих материалов с небольшими добавками жидкости (мокрое смешение), хотя в принципе в каждом из них может быть реализовано смешение только сухих материалов (сухое смешение).

Из вибросмесителей первой группы при непрерывном смешении сухих сыпучих материалов хорошо зарекомендовали себя смесители ДВС-Н, разработанные ВНИИНСМом, и трубные вибросмесители.

Принципиальная схема конструкции вибросмесителя ДВС-Н представлена на рис. 6. В овальном корпусе 1 смесителя смонтированы два вала 6 с лопатками 7. Валы 6 вращаются навстречу друг другу. Одна часть приваренных к валам 6 лопаток 7 имеет угол атаки 90°, а другая — 45°. Первые лопатки выполняют функцию перемешивания, а вторые служат для продвижения смешиваемых компонентов вдоль корпуса 1, который закреплен на сварной раме 2, установленной на пружинах 5. Рама 2 совершает колебательные движения за счет вращения дебалансного вала 4. В нижней части рамы 2 установлен противовес 3. Валы 6 смесителя приводятся во вращение от электродвигателя через редуктор, который смонтирован на жесткой станине смесителя. К этой станине прикреплены и нижние части пружин 5. Выходной вал редуктора соединен с одним из лопастных валов 6 смесителя пружиной или резиновой муфтой. Второй лопастной вал 6 имеет привод от первого лопастного вала через зубчатую пару. Дебалансный вал 4 приводится во вращение либо от самостоятельного электродвигателя, либо от электродвигателя, вращающего лопастные валы 6.

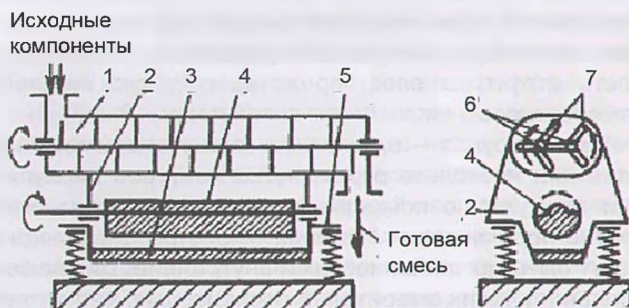
Вибросмеситель ДВС-Н работает следующим образом. Подлежащие смешению компоненты при помощи дозаторов подаются в приемную воронку вибросмесителя, откуда попадают во внутреннюю полость аппарата. Там компоненты подвергаются интенсивному перемешиванию лопатками 7 с углом атаки 90°, а лопатками 7 с углом атаки 45° смесь проталкивается вдоль корпуса смесителя к выгрузному штуцеру, откуда поступает в приемный бункер.

Благодаря вращению лопастей 7 и вибрации корпуса 1 в вибросмесителе ДВС-Н создается интенсивная внутренняя циркуляция смешиваемого материала в поперечных сечениях аппарата, приводящая к высоким скоростям процесса радиального смешения. Кроме этого, в данном аппарате наблюдается также явление псевдооживления сыпучего материала. Интенсивность воздействия вращающихся лопастных валов 6 на сыпучий материал при прочих равных условиях прямо пропорциональна квадрату их длины, первой степени числа их оборотов и частоты вибрации, а также обратно пропорциональна диаметру лопастных валов.

В вибросмесителе ДВС-Н удельные энергозатраты на единицу готовой продукции увеличиваются прямо пропорционально рабочему объему аппарата [1, 3].

Примеры новых конструктивных разработок вибрационных смесителей приведены в [21–23].

К достоинствам вибрационных смесителей относятся: универсальность использования (для смешения



- 1 — овальный корпус; 2 — рама; 3 — противовес;
4 — дебалансный вал; 5 — пружинный амортизатор;
6 — смесительный вал; 7 — лопатка

Рис. 6. Принципиальная схема циркуляционного вибросмесителя ДВС-Н конструкции ВНИИНСМа

различных видов материалов); высокий коэффициент заполнения рабочего объема аппарата (0,8 %–0,9 %); хорошее качество смешения сыпучих материалов за короткий промежуток времени; высокая производительность по готовой смеси; возможность работы в непрерывном режиме.

Недостатки вибрационных смесителей: значительные динамические нагрузки на рабочие органы и опорные узлы аппарата; большая металлоемкость; существенный износ рабочих органов и корпуса аппарата; достаточно большие энергозатраты на единицу готовой смеси.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СМЕСИТЕЛИ

К пневматическим смесителям относятся аппараты, в которых смешение осуществляется в слое зернистого материала псевдооживленным газом.

Известно [24], что при псевдооживлении слоя сыпучего материала газом его гомогенизация может быть достигнута за очень короткий промежуток времени. Этому способствует продольное перемешивание частиц и общая циркуляция массы в сосуде над газораспределительным устройством: вверх по центру и вниз по стенкам. Если нижнюю часть аппарата сделать конической формы, то циркуляция материала будет более полной: не будет пассивных зон, какие наблюдаются при плоской газораспределительной решетке.

Слои небольшой высоты над решеткой более турбулизованы, поэтому перемешивание в них равномерное. Это позволяет сделать заключение о более высокой эффективности пневмосмесителей небольшой емкости. Однако пневмосмесители тонкодисперсных материалов требуют специальных улавливающих устройств. По этой причине известные пневмосмесители рассчитаны на большие емкости, когда применение улавливающих систем будет экономически более целесообразным [1].

Все пневматические смесители можно условно разделить на четыре группы в зависимости от принципа их действия.

В первую группу входят *азрационные* смесители, в которых перемешивание осуществляется в псевдооживленном слое в режиме стационарного интенсивного или более спокойного кипения. Азрационные смесители предназначены для тонкодисперсных продуктов, мало различающихся по плотности.

Ко второй группе можно отнести *азрационные импульсные* смесители, в которых на стационарное псевдооживление накладываются дополнительные импульсы, создающие в отдельных зонах режимы бурного кипения: импульсы могут быть общие, зональные и локальные, образованные воздушными струями, пересекающимися псевдооживленный продукт в различных направлениях. Цель импульсов — увеличить нестационарность структуры слоя, предотвращающую явления самосортирования.

Третья группа — *эрлифтные* смесители, имеющие один или несколько разомкнутых контуров циркуляции продукта, с помощью которых продукт многократно перекачивают "на себя". Контур циркуляции могут быть как внешние, так и внутренние. Цикл смешивания у таких смесителей относительно велик, так как надо обеспечить определенную кратность перекачки всего объема продукта. В эрлифтных смесителях можно успешно смешивать сыпучие материалы с различающимися физико-химическими свойствами, а также жидкие продукты.

К четвертой группе относятся *комбинированные пневмомеханические* смесители, в которых в слое псевдооживленного и кипящего продукта работают разного рода мешалки, т. е. дополнительные рабочие органы, ускоряющие процесс смешения и повышающие качество смеси за счет предотвращения ее расслоения.

Выбор конкретного типа смесителя зависит от физико-механических свойств смешиваемого продукта и требований, предъявляемых к качеству смеси [25, 26].

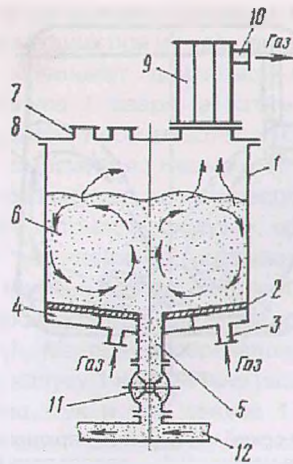
В настоящее время наибольший практический интерес представляют смесители второй группы, поскольку они обладают "оптимальной" продолжительностью смешения и достаточно высокой суммарной эффективностью.

Так, например, в устройствах пневматического смешения порошковых и гранулированных материалов применяют сопла, расположенные в один или несколько рядов в нижней части смесительной камеры, через которые импульсами подают сжатый газ; перфорированные днища или комбинации труб и насадок. В смесительной камере в результате псевдооживления создается направленная циркуляция материала, интенсифицирующая процесс его смешения [2].

Азрационный смеситель с псевдооживленным слоем материала представлен на рис. 7. Данный аппарат состоит из сварного цилиндрического корпуса 1, который футеруется изнутри. В нижней части корпуса 1 жестко закреплена газораспределительная решетка 2 из секторных керамических плит толщиной 20 мм. Псевдооживляющий газ подводится через штуцера 3 в сварной короб коллектора 4, разделенный на две камеры глухой перегородкой. В центральной части днища расположен штуцер 5 для удаления готовой смеси. Компоненты исходной смеси 6 загружаются в смеситель через специальные штуцера 7, расположенные в плоской крышке 8. При этом коэффициент заполнения смесителя не превышает 0,6. На крышке 8 закреплен рукавный фильтр 9 для очистки отходящего из смесителя газа.

Азрационный смеситель с псевдооживленным слоем материала работает следующим образом. После загрузки исходного материала в смеситель в коллектор 4 под некоторым давлением начинают подаваться псевдооживляющий газ, откуда он через керамическое пористое днище (газораспределительную решетку 2) поступает во внутреннюю полость аппарата. Газ проходит сквозь слой материала в направлении снизу вверх и псевдооживляет его. Известно [24], что при псевдооживлении сыпучего материала в цилиндрических аппаратах возникает направленная внутренняя циркуляция материала: по стенкам корпуса он движется вниз, а в центре — вверх. Чтобы увеличить скорость направленной циркуляции, которая улучшает гомогенизацию материала во всем объеме смесителя, через разные зоны газораспределительной решетки 2 подается неодинаковое количество газа. В центральную часть коллектора 4 газ подается в большем объеме, а на периферию в меньшем, создавая таким образом восходящую циркуляцию в центре смесителя. Поэтому коллектор 4 и разделен на две камеры. Отходящий из смесителя газ очищается в рукавном фильтре 9, а затем удаляется из смесителя через штуцер 10.

Цикл смешения в азрационном смесителе с псевдооживленным слоем материала может продолжаться несколько часов. После смешения готовая смесь через штуцер 5 и секторный питатель 11 поступает в линию пневмотранспорта 12 готового продукта. Во время раз-



- 1 — цилиндрический корпус; 2 — газораспределительная решетка; 3 — штуцер для подвода псевдооживляющего газа; 4 — коллектор; 5 — штуцер удаления готовой смеси; 6 — смешиваемый материал; 7 — загрузочный штуцер; 8 — плоская крышка; 9 — рукавный фильтр; 10 — штуцер выхода очищенного газа; 11 — секторный питатель; 12 — линия пневмотранспорта готовой смеси

Рис. 7. Азрационный смеситель с псевдооживленным слоем материала

грузки смесителя в него продолжает подаваться псевдооживляющий газ, но в значительно меньшем количестве (примерно в три раза), чем при процессе гомогенизации. При этом скорость разгрузки смесителя принимается равной производительности цеха по продукту, находящемуся в аппарате [1, 3].

Как показывает практика, у большинства пневматических смесителей эффективность работы заметно падает при перемешивании тонкодисперсных компонентов, значительно отличающихся по плотности.

Пылевидные сыпучие материалы плохо псевдооживаются продукцией газом из-за возникающего при этом явления **каналообразования**: в слое материала возникают вертикальные каналы, по которым движется газ, между этими каналами материал остается практически неподвижным. Каналообразования можно избежать, если в подлежащий псевдооживлению слой сыпучего материала ввести вращающуюся лопастную мешалку. Однако даже в этом случае стоимость смешения сыпучих компонентов в пневмосмесителе будет обходиться как минимум в 2–2,4 раза дороже, чем в барабанном биконическом смесителе.

Кроме каналообразования в пневматических смесителях также наблюдается быстрое расслоение частиц сыпучего материала в псевдооживленном слое по вертикали согласно их массам. Данное обстоятельство не позволяет организовать длительный цикл смешения сыпучих компонентов в пневмосмесителях, что, в итоге, приводит к сравнительно плохому качеству смешения [26].

Частично этого явления можно избежать, если газ подавать в слой не непрерывно, а циклично, и не снизу вверх, а тангенциально по отношению к корпусу.

К достоинствам пневматических смесителей относятся: простота конструкции и техобслуживания; отсутствие, в большинстве случаев, движущихся рабочих органов (побудителей смешения); относительно короткий цикл смешения; малое истирание гранул сыпучего материала за цикл смешения; возможность смешения как сыпучих, так и жидких материалов; низкие энергозатраты на единицу готовой смеси.

Недостатки пневматических смесителей: удовлетворительное качество смешения большинства сыпучих

материалов; плохое качество смешения сыпучих материалов с существенной разницей в удельных весах и большой дисперсностью; возможность каналообразования и расслоения частиц материала в псевдооживленном слое; необходимость использования фильтров тонкой очистки при смешении пылевидных и порошкообразных материалов; низкий коэффициент заполнения рабочего объема аппарата (0,5–0,6); быстрая забивка газораспределительных решеток и пылеотбойных перегородок аппарата.

ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СМЕСИТЕЛИ

В барабанных смесителях промышленного типа достаточная для практических целей однородность смеси может быть достигнута только по истечении длительного промежутка времени, что обусловлено слабой циркуляцией сыпучего материала в рабочем объеме аппарата. Данного недостатка полностью лишены циркуляционные центробежные смесители с псевдооживлением сыпучего материала быстровращающимся ротором.

Как уже упоминалось выше, псевдооживление слоя твердого сыпучего материала потоком газа сопровождается их интенсивным перемешиванием. Однако использование этого свойства псевдооживленного слоя для смешения тонкодисперсных материалов в пневматических смесителях крайне затруднительно вследствие возможности каналообразования и расслоения частиц материала в псевдооживленном слое, а также большого уноса частиц газом и необходимости установки дорогостоящего пылеулавливающего оборудования. Поэтому пневматические смесители не получили столь широкого распространения в промышленности, как, например, механические смесители.

В циркуляционных центробежных смесителях использован принцип перевода сыпучего материала в псевдооживленное состояние с помощью быстровращающегося ротора. Эксперименты, проведенные Ю. И. Макаровым [1, 3], показали, что псевдооживление сыпучих материалов с помощью вращающейся в их среде лопастной мешалки весьма эффективно и зависит главным образом от скорости вращения лопастей, их формы, числа, размеров, взаимного расположения, а также от высоты слоя материала над лопастью и физико-механических свойств сыпучего материала.

В зависимости от конструкции ротора циркуляционные центробежные смесители с псевдооживленным слоем подразделяются на: лопастные, дисковые, шнековые, с вращающимся конусом и прямоочные. При этом ротор центробежно-лопастного смесителя может быть выполнен в виде лопастной, якорной, турбинной, типа "беличьего колеса" мешалок, дисков, прутков и т. д.

На рис. 8 представлена схема циркуляционного центробежно-лопастного смесителя с псевдооживлением сыпучего материала быстровращающимся ротором, выполненным в виде пропеллерной мешалки. В коническом корпусе 1 данного смесителя, зауженном в верхней части, установлен смесительный ротор, жестко закрепленный на конце консольного вала, приводимого во вращение от двухскоростного электродвигателя через понижающую клиноременную передачу. Консольный вал проходит через центр выпуклого днища смесителя. Место прохода вала через днище уплотняется сальником. Смесительный ротор представляет собой две

пропеллерные мешалки, смонтированные одна над другой. Верхняя меньшая мешалка 2 устанавливается у вершины образующейся воронки сыпучего материала, а нижняя мешалка 3 повторяет форму дна и имеет размах лопастей, приблизительно равный диаметру широкой части корпуса 1. Углы атаки лопастей мешалок противоположны. Сквозь крышку корпуса пропущен полый стержень с направляющей лопаткой 4. Угол атаки лопатки 4 настраивают поворотом стержня, положение которого фиксируется зажимным приспособлением, смонтированным на крышке смесителя. В полость стержня вмонтирована термопара, позволяющая определять температуру внутри перемешиваемой массы.

Данный смеситель работает следующим образом. При вращении роторного вала смешиваемые компоненты, засыпанные в корпус 1 смесителя, засасываются верхней мешалкой 2 и проталкиваются на нижнюю мешалку 3. Нижняя мешалка 3 сообщает массе материала вращательное движение, благодаря которому на частицы начинают действовать центробежные силы и силы кориолисова ускорения. Под действием этих сил частицы материала от центра смесителя перемещаются по спиральным траекториям сначала к стенкам корпуса 1, а затем по ним вверх. В верхнем слое частицы материала движутся к оси вращения мешалок. Таким образом, в данном смесителе наблюдается та же картина циркуляции материала и его псевдооживление, что и при воздействии на него лопастной мешалки. Верхняя мешалка лишь ускоряет продвижение материала к рабочему органу псевдооживления, т. е. к нижней мешалке 3. Назначение направляющей лопатки 4 — способствовать более быстрому продвижению материала от стенок корпуса 1 к верхней мешалке 2. Угол атаки направляющей лопатки 4 выбирают таким, чтобы можно было направить частицы материала от стенки к центру не по спиральям, а по более короткому пути. Образующиеся при этом завихрения материала около направляющей лопатки 4 способствуют более быстрому его смешению. Коническая форма корпуса 1 способствует увеличению кратности циркуляции, так как путь движения частиц к центру при этом уменьшается.

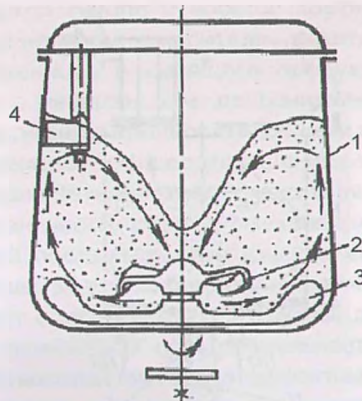
При многократном соударении частиц материала между собой, о стенки корпуса 1 и лопасти мешалок 2 и 3 возникает значительный тепловой эффект. Однако вследствие краткости цикла смешения в таких смесителях материал не успевает разогреться до опасных температур.

Рассмотренный выше смеситель может обеспечить хорошее качество смешения сыпучих материалов ($V_c = (2,5-6,0) \%$) за промежуток времени 30 мин. Коэффициент заполнения рабочего объема смесителя материалом равен 0,9 [3].

В центробежных смесителях с вращающимся конусом интенсивная внутренняя циркуляция сыпучего материала осуществляется за счет скоростного вращения ротора, выполненного в виде полого усеченного (а в некоторых случаях и перфорированного) конуса.

Схема центробежного смесителя с вращающимся конусом конструкции МИХМа представлена на рис. 9.

Основным рабочим элементом данного смесителя является полый усеченный конус 1, установленный в корпусе 2. Верхняя часть корпуса 2 — цилиндрической, нижняя — конической формы. Конус 1 крепится на консольном валу 3, который пропущен внутрь корпуса 2 либо через днище корпуса 2 (нижний привод), либо через крышку смесителя 4. К нижней части конуса 1 жестко прикреплена радиальная лопастная мешалка 5, угол

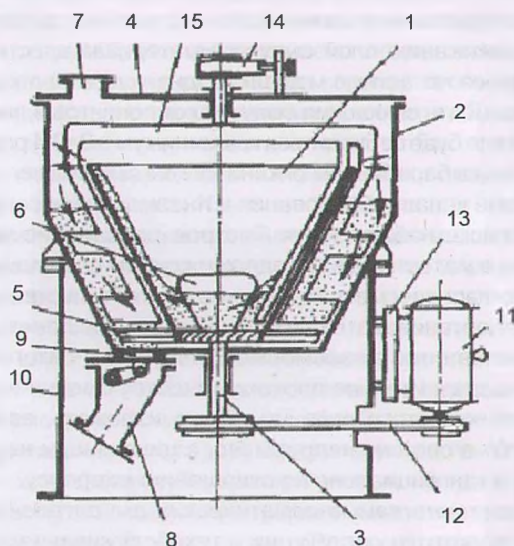


1 — конический корпус; 2 — верхняя мешалка; 3 — нижняя мешалка; 4 — направляющая лопатка

Рис. 8. Принципиальная схема циркуляционного центробежно-лопастного смесителя с пропеллерной мешалкой

атаки которой равен 45° . В нижней части конуса 1 прорезаны два симметрично расположенных окна 6. В смеситель сыпучий материал загружают навалом через штуцер 7 (один или несколько), расположенный в плоской крышке 4. Готовая смесь выводится из смесителя через клапанную коробку 8, прикрепленную к днищу корпуса 2. Привод клапана 9, который в моменты заполнения смесителя и смешения сыпучих продуктов в нем закрывает выпускное отверстие в днище корпуса 2, — ручной или пневматический. Вывод приводного вала из корпуса смесителя герметизирован сальником с мягкой набивкой. Корпус 2 смесителя установлен на сварной подставке 10 цилиндрической формы. Вал 3 приводится во вращение от электродвигателя 11 через клиноременную передачу 12. Электродвигатель 11 смонтирован на подвижной плите 13, ось которой закреплена на корпусе подставки 10.

При вращении конуса 1 материал, попавший в него при засыпке, вследствие сил трения начинает



1 — полый усеченный конус; 2 — корпус; 3 — консольный вал; 4 — плоская крышка; 5 — радиальная лопастная мешалка; 6 — окно; 7 — штуцер загрузки исходных компонентов; 8 — клапанная коробка; 9 — клапан; 10 — цилиндрическая подставка; 11 — электродвигатель; 12 — клиноременная передача; 13 — подвижная плита; 14 — ленточный тормоз; 15 — вращающаяся рама с лопастями и скребком

Рис. 9. Схема центробежного смесителя с вращающимся конусом конструкции МИХМа

вовлекаться во вращение. Частицы материала под влиянием возникающих при их вращении центробежных сил инерции начинают двигаться по внутренней поверхности конуса 1 вверх, а затем сбрасываются с него в кольцевое пространство между конусом 1 и корпусом 2 смесителя. Новые порции материала поступают внутрь конуса 1 из кольцевого пространства через окна 6. Лопастная мешалка 5, вращаясь вместе с конусом 1, увеличивает подвижность сыпучего материала в нижней части корпуса 2 смесителя, способствуя прохождению материала через окна 6 внутрь конуса 1. Материал перемешивается как при подъеме его по конусу 1 вследствие разных траекторий движения частиц, так и вне конуса 1 вследствие их перераспределения во время отскока от стенок корпуса 2, опускания по кольцевому пространству вниз и псевдооживления лопастной мешалкой 5.

Для материалов с плохой сыпучестью в корпусе 2 дополнительно устанавливают свободно вращающуюся раму 15 с лопастями и скребком, который входит внутрь конуса 1. Рама 15 под влиянием сил, действующих со стороны материала на скребок и лопасти, начинает вовлекаться во вращение. Скорость вращения рамы 15 регулируют ленточным тормозом 14. Вследствие устанавливаемой с помощью тормоза 14 разности скоростей вращения лопастей и увлеченного конусом 1 материала последний, наталкиваясь на лопасти, частично поступает внутрь конуса 1 через окна 6, а остальная его часть обтекает их. Возникающие при этом завихрения способствуют более интенсивному протеканию процесса смешения.

Величина коэффициента неоднородности смеси $V_{с}$, достигаемая в смесителях с вращающимся конусом, зависит от конструктивных размеров рабочих органов смесителя, режима его работы и физико-механических свойств перемешиваемой смеси.

Благодаря высокому значению величины кратности циркуляции материала в корпусе аппарата, в данном центробежном смесителе было получено высокое качество смешения легких порошкообразных материалов и сыпучих материалов с большой разностью плотностей частиц за небольшой промежуток времени [1, 3, 13].

Примеры новых конструктивных разработок центробежных смесителей с вращающимся конусом приведены в [27–30].

В производстве строительных материалов и других отраслях промышленности, когда необходимо совместить операции смешения и дробления с целью получения однородной высокодисперсной смеси, применяют непрерывные центробежно-ударные смесители.

Схема прямоточного центробежно-ударного смесителя непрерывного действия представлена на рис. 10.

В верхней части конического корпуса 1 смесителя размещен центробежный ротор, состоящий из нижнего диска 2, жестко соединенного с верхним диском 3 планками 4, расположенными на периферии дисков в шахматном порядке. На плоской крышке корпуса 1 закреплен вертикальный фланцевый электродвигатель 5, вал которого жестко связан с центробежным ротором. Непрерывная загрузка обрабатываемых материалов производится через штуцера 7. Конический корпус 1 — съемный, прикреплен к крышке накладными болтами с барашковыми гайками. Для осмотра и чистки ротора корпус 1 можно легко снять и затем так же поставить на место. К крышке корпуса 1 жестко прикреплены три ли-

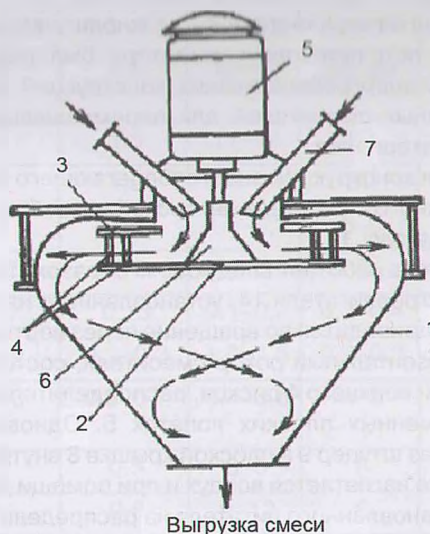
тых стойки. В загрузочных штуцерах 7 имеются пазы для заслонок, которыми можно регулировать подачу компонентов на обработку. Ротор вращается от двухскоростного электродвигателя 5 во взрывобезопасном исполнении.

Центробежно-ударный смеситель работает следующим образом. Через загрузочные штуцера 7 смешиваемые компоненты подносятся на распределительный конус 6, который перенаправляет их на нижний диск 2 ротора, вращающегося с большой скоростью (3500–4000 об/мин). Под действием центробежной силы частицы материала с возрастающей скоростью отбрасываются к периферии дисков 2 и 3. Наталкиваясь на первый ряд ударных планок 4, частицы изменяют траекторию своего движения, соударяются друг с другом, наталкиваются на второй ряд ударных планок 4 и снова перераспределяются. Сброшенные с диска 2 частицы материала с большой скоростью ударяются о стенки корпуса 1 и по спиральной траектории опускаются к выгрузному отверстию. Согласно закону сохранения количества движения, частицы в узкой части корпуса 1 имеют большую скорость, чем в широкой его части. Благодаря этому достигается турбулизация потока частиц материала на выходе из смесителя и, следовательно, создаются условия для дополнительного их перемешивания.

Такой смеситель может обеспечить хорошее качество смешения сыпучих материалов за относительно короткий промежуток времени и при относительно небольших энергозатратах [1, 3].

Примеры новых конструктивных разработок центробежных смесителей-измельчителей приведены в [31–34].

К достоинствам центробежных смесителей относятся: хорошее качество смешения сыпучих материалов (даже легких порошкообразных и с большой разностью плотностей); большая удельная производительность по готовой смеси; возможность совмещения в одном устройстве двух процессов (смешения и сушки, смешения и дробления и т. п.); относительно короткий цикл смешения; возможность смешения как сыпучих, так и жидких материалов; низкие энергозатраты на единицу готовой смеси (кроме дисковых и шнековых смесителей).



- 1 — конический корпус; 2 — нижний диск; 3 — верхний диск;
4 — планки; 5 — электродвигатель;
6 — распределительный конус;
7 — штуцер загрузки исходных компонентов

Рис. 10. Схема прямоточного центробежно-ударного смесителя непрерывного действия

Недостатки центробежных смесителей: значительные динамические нагрузки на рабочие органы и опорные узлы аппарата; износ рабочих органов и корпуса аппарата; невозможность обработки гранулированных сыпучих материалов, размер и форма частиц которых должны быть сохранены (особенно в центробежно-ударных смесителях); выделение большого количества тепла из-за трения частиц материала о роторные диски, стенки корпуса и между собой (особенно в дисковых и шнековых смесителях).

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО СМЕСИТЕЛЯ

На основании всестороннего анализа научно-технической и патентной литературы по проблеме интенсификации процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесительного оборудования автором составлена сводная таблица технико-экономической эффективности современных смесителей (таблица 1).

В настоящее время из-за отсутствия абсолютно точных или достоверных данных проблематично анализировать технико-экономическую эффективность современного смесительного оборудования. Поэтому представленные в таблице 1 технико-экономические характеристики следует рассматривать как ориентировочные.

Однако, анализируя даже эти ориентировочные данные, можно отметить, что высокая эффективность перемешивания при относительно низких удельных энергозатратах и времени смешения наблюдается в биплантарном смесителе БСП, трубном вибросмесителе, многоярусном центробежно-лопастном, центробежном прямоточном и центробежно-ударном смесителях.

Учитывая вышеизложенное, автор делает вывод, что в настоящее время наиболее перспективными для промышленного использования являются смесители именно центробежного типа.

Проанализировав достоинства и недостатки современных центробежных смесителей, на кафедре "Машины и аппараты химических и силикатных производств" Белорусского государственного технологического университета под руководством автора был разработан ряд новых энергосберегающих конструкций роторно-центробежных смесителей для перемешивания сухих сыпучих материалов.

Типовая конструкция энергосберегающего роторно-центробежного смесителя авторской разработки представлена на рис. 11.

Смеситель работает следующим образом. После запуска электродвигателя 14, установленного на плоской крышке 8, приводится во вращение через вертикальный вал 6 горизонтальный ротор смесителя, состоящий из нижнего 3 и верхнего 4 дисков, распределительного конуса 7, сменных плоских лопаток 5. Одновременно с этим через штуцер 9 в плоской крышке 8 внутрь корпуса аппарата нагнетается воздух и при помощи дополнительно установленного питателя на распределительный конус 7 ротора смесителя подается первый (основной) компонент смеси. После схода с распределительного конуса 7 частицы первого компонента смеси попадают на нижний диск 3 вращающегося ротора и, двигаясь по нему и вдоль плоских лопаток 5, под действием центробежной силы разбрасываются последними на перифе-

рию к плоской стенке цилиндрической обечайки 1 корпуса смесителя. При этом за счет наклона разгонных лопаток 5 к радиусу аппарата под определенным углом и вращения ротора смесителя с определенной скоростью частицы первого компонента смеси после схода с плоской поверхности лопаток 5 или роторного диска 3 приближаются к стенке цилиндрической обечайки 1 по касательной траектории с наименьшим углом атаки, что способствует снижению вероятности их полного или частичного разрушения. Одновременно с этим, за счет вращения горизонтального ротора внутри корпуса аппарата создается разрежение воздуха, что способствует самопроизвольному нагнетанию внутрь корпуса смесителя через тангенциальные штуцеры 10, 11 и 12, смонтированные на одном уровне в верхней части цилиндрической обечайки 1, дополнительных (второго, третьего и четвертого) компонентов смеси в заданных пропорциях. Так как тангенциальные штуцеры 10, 11 и 12 расположены на одном уровне и выполнены в форме сужающихся к выходу сопел, имеющих прямоугольное выходное отверстие с существенным преобладанием высоты над шириной, то подаваемые через них компоненты смеси поступают внутрь корпуса аппарата по касательным траекториям тонким слоем (толщиной 3-5 мм), с одновременным наложением их друг на друга и последующим перемещением по спиралеобразной траектории вдоль стенок цилиндрической 1 и конической 2 обечаек корпуса смесителя сверху вниз к штуцеру выгрузки готовой смеси 13.

В процессе работы роторно-центробежного смесителя наиболее интенсивное смешение основного и дополнительных компонентов смеси происходит в кольцевом зазоре между выходной кромкой разгонных лопаток 5 и стенкой цилиндрической обечайки 1 корпуса аппарата при наложении их друг на друга тонкими слоями и при взаимном проникновении частиц из одного слоя в другой. Дополнительное перемешивание компонентов смеси происходит в результате их совместного перемещения по спиралеобразной траектории вдоль стенок цилиндрической 1 и особенно, сужающейся к низу, конической 2 обечаек корпуса смесителя сверху вниз.

Так как процесс перемешивания в роторно-центробежном смесителе предполагает относительно небольшую скорость вращения ротора (около 1000-1500 об/мин), подачу и последующее распыление компонентов смеси в корпусе аппарата тонкими, накладывающимися друг на друга слоями, а также относительно малое время пребывания компонентов смеси внутри корпуса аппарата, то, на основании вышесказанного, в данном смесителе можно прогнозировать достаточно высокое качество смешения сухих сыпучих материалов в микрообъемах за небольшой промежуток времени и при относительно малых энергозатратах, а также существенное снижение вероятности принудительного измельчения компонентов смеси при их ударе о боковую поверхность цилиндрического корпуса аппарата.

На новую конструкцию роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов (см. рис. 11) была подана заявка на изобретение № а 20090025 от 09.01.2009.

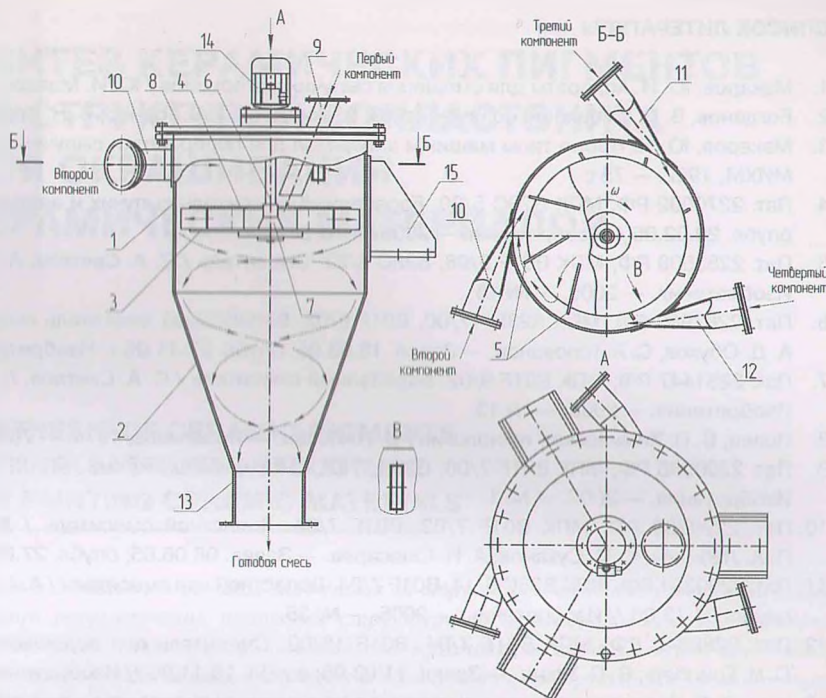
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основании всестороннего анализа специальной научно-технической и патентной литературы в ста-

тье обобщены различные способы интенсификации процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей, составлена сводная таблица технико-экономической эффективности современного смесительного оборудования (см. таблицу 1).

2 Критически оценивая приведенные в таблице 1 данные, можно сделать вывод, что в настоящее время для промышленного использования наиболее перспективными, с точки зрения высокой эффективности перемешивания при относительно низких удельных энергозатратах и времени смешения, являются именно центробежные смесители.

3 По итогам анализа достоинств и недостатков современных центробежных смесителей на кафедре "Машины и аппараты химических и силикатных производств" Белорусского государственного технологического университета под руководством автора был разработан ряд новых энергосберегающих роторно-центробежных смесителей для перемешивания сухих сыпучих материалов. В статье приведена типовая конструкция роторно-центробежного смесителя авторской разработки (см. рис. 11) и описан принцип его действия.



- 1 — цилиндрическая обечайка; 2 — коническая обечайка;
- 3 — нижний диск; 4 — верхний диск; 5 — лопатка;
- 6 — роторный вал; 7 — распределительный конус; 8 — плоская крышка;
- 9 — штуцер загрузки первого компонента;
- 10 — штуцер загрузки второго компонента;
- 11 — штуцер загрузки третьего компонента;
- 12 — штуцер загрузки четвертого компонента;
- 13 — штуцер выгрузки готовой смеси; 14 — электродвигатель;
- 15 — опоры-лапы

Рис. 11. Роторно-центробежный смеситель

Таблица 1. Техничко-экономические характеристики современного смесительного оборудования для перемешивания сухих сыпучих материалов

№ п/п	Тип смесителя	Кoeffициент заполнения	Удельная производительность, т·м ³ /ч	Удельная металлоемкость, т·ч/м ³	Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	Время смешения, мин	Кoeffициент однородности (V _c) _{нр} , %
1	Барабанный с горизонтальным цилиндрическим корпусом	0,6	0,16–0,65	0,6–2,4	3,0–11,6	60–240	10–15
2	Барабанный бидрический	0,6	0,32–0,65	0,68–1,36	2,7–5,5	60–120	8–12
3	Барабанный тетраэдрический	0,6	0,32–0,65	0,5–1,0	2,7–5,5	60–120	6–10
4	Двухроторный червячно-лопастной с реверсивным шнеком	0,9	1,6	4,2	12–17	30–60	10–12
5	Плужный	0,8	1,6	1,5	11–15	60	12–16
6	Ленточный	0,9	1,1	1,5	7,5–11	60	12–16
7	Бипланетарный БСП	0,8	1,3	1,6	4,0–6,3	3–6	1,5–5,0
8	Смесительные бегуны центробежного типа	0,6	0,4–0,82	2,1	3,4–6,0	6	6–14
9	Гравитационный ударно-распылительный	0,01	5–10	0,13	0,1–0,2	0,3–0,4	5–6
10	Трубный вибросмеситель	0,8	20–30	0,2–0,3	1,0–1,5	0,2–0,3	3–4
11	Эрлифтный пневмосмеситель с внутренней циркуляцией материала	0,5–0,6	10–16	0,5–0,7	0,4–0,5	4–5	6–9
12	Многоярусный центробежно-лопастной	0,9	1,7	0,5	3–5	6	2–4
13	Центробежно-дисковый	0,6	3	0,8	9–12	6	3–6
14	Центробежно-шнековый	0,5	3	1,4	14–16	6–12	5–7
15	Центробежный с вращающимся конусом	0,5	1,4	1,6	1,0–1,5	5–10	2–5
16	Центробежный прямоточный	0,01	5–10	0,8	0,2	0,1–0,15	3–5
17	Центробежно-ударный	0,01–0,02	1,8	1,0	0,1–0,15	0,1–0,2	4–8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. — М.: Машиностроение, 1973. — 215 с.
2. Богданов, В. В. Смешение полимеров / В. В. Богданов, Р. В. Торнер, В. Н. Красовский, Э. О. Редер. — Л.: Химия, 1979. — 192 с.
3. Макаров, Ю. И. Новые типы машин и аппаратов для переработки сыпучих материалов / Ю. И. Макаров, А. И. Зайцев. — М.: МИХМ, 1982. — 75 с.
4. Пат. 2270092 РФ, МПК В28С 5/20. Барабанный смеситель сыпучих и вязких материалов / Е. Н. Иванов. — Заявл. 01.06.04; опубл. 20.02.06 // Изобретения. — 2006. — № 5.
5. Пат. 2253508 РФ, МПК В01F 9/06, В28С 5/22. Смеситель / С. А. Светлов, А. Г. Карпов. — Заявл. 15.07.03; опубл. 10.06.05 // Изобретения. — 2005. — № 16.
6. Пат. 2287969 РФ, МПК А23N 17/00, В01F 9/02. Барабанный смеситель сыпучих кормов / В. И. Сыроватко, А. С. Комарчук, А. Д. Обухов, С. А. Голованов. — Заявл. 18.03.05; опубл. 27.11.06 // Изобретения. — 2006. — № 33.
7. Пат. 2251447 РФ, МПК В01F 9/02. Барабанный смеситель / С. А. Светлов, А. Г. Карпов. — Заявл. 03.06.03; опубл. 10.05.05 // Изобретения. — 2005. — № 13.
8. Исаев, В. П. Химическая технология / В. П. Исаев. — Ярославль, 1974. — 76 с.
9. Пат. 2290986 РФ, МПК В01F 7/08, В29В 7/42. Смеситель шнековый / А. Ш. Либерман. — Заявл. 15.03.05; опубл. 10.01.07 // Изобретения. — 2007. — № 1.
10. Пат. 2299759 РФ, МПК В01F 7/02, В01F 7/04. Лопастной смеситель / А. Т. Лебедев, А. В. Захарин, М. А. Красников, П. А. Лебедев, С. С. Суханов, А. Н. Слюсарев. — Заявл. 08.06.05; опубл. 27.05.07 // Изобретения. — 2007. — № 15.
11. Пат. 2290301 РФ, МПК В28С 5/14, В01F 7/04. Лопастной вал смесителя / А. А. Богомолов, М. П. Покушалов. — Заявл. 04.08.05; опубл. 27.12.06 // Изобретения. — 2006. — № 36.
12. Пат. 2286843 РФ, МПК В01F 7/04, В01F 15/00. Смеситель для порошков / Л. П. Гаранин, И. Г. Гатаулин, Г. В. Куценко, С. И. Гринберг, В. П. Уткин. — Заявл. 11.03.05; опубл. 10.11.06 // Изобретения. — 2006. — № 31.
13. Ким, В. С. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков. — М.: Химия, 1988. — 240 с.
14. Пат. 2258558 РФ, МПК В01F 7/30, А01С 1/02. Планетарный смеситель / В. И. Пожбелко, А. В. Ковнацкий. — Заявл. 28.06.04; опубл. 20.08.05 // Изобретения. — 2005. — № 23.
15. Пат. 2253507 РФ, МПК В01F 7/30, А21С 1/02. Планетарный смеситель / В. И. Пожбелко, А. В. Ковнацкий. — Заявл. 16.06.04; опубл. 10.06.05 // Изобретения. — 2005. — № 16.
16. Гячев, Л. В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л. В. Гячев. — М.: Машиностроение, 1968. — 184 с.
17. Долгунин, В. Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев. — М.: Издательство Машиностроение-1, 2005. — 112 с.
18. Арефьев, В. Л. Вибрация в технике. Обзор / В. Л. Арефьев. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1970. — 82 с.
19. Арефьев, В. Л. Применение вибрации для интенсификации процессов перемешивания жидких сред. Обзор / В. Л. Арефьев. М.: ЦНИИИИТЭИЦМ, 1977. — 48 с.
20. Смесительные машины в хлебопекарной и кондитерской промышленности / А. Т. Лисовенко [и др.]; под общ. ред. А. Т. Лисовенко. — К.: Урожай, 1990. — 192 с.
21. Пат. 2286203 РФ, МПК В01F 11/00, В01F 3/18. Вибрационный смеситель / А. Б. Шушпанников, Г. Е. Иванец, А. Г. Золин, В. Н. Чистюхин, Е. В. Капранков. — Заявл. 11.05.05; опубл. 27.10.06 // Изобретения. — 2006. — № 30.
22. Пат. 2256492 РФ, МПК В01F 11/00. Вибрационный смеситель периодического действия / С. А. Соловьев, В. А. Пушко, А. В. Салтанов. — Заявл. 28.07.03; опубл. 20.07.05 // Изобретения. — 2005. — № 20.
23. Пат. 2270055 РФ, МПК В01F 11/00. Вибрационный смеситель / А. Н. Гладышев, А. А. Гладышев, В. А. Гладышев. — Заявл. 17.08.04; опубл. 20.02.06 // Изобретения. — 2006. — № 5.
24. Розумов, И. М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / И. М. Розумов. — М.: Химия, 1972. — 240 с.
25. Черняев, Н. П. Пневматическое смешение, состояние и перспективы использования в технологии производства комбикормов. Обзорная информация / Н. П. Черняев, Ю. Д. Гавриченко, В. Л. Свердлов. — М.: ЦНИИТЭИ, 1989. — 48 с.
26. Росляк, А. Т. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии / А. Т. Росляк, Ю. А. Бирюков, В. Н. Пачин. — Томск: Издательство Томского университета, 1990. — 272 с.
27. Пат. 227901 РФ, МПК В01F 7/26, В28С 5/16. Центробежный смеситель / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, Д. М. Бородулин, В. П. Зверев. — Заявл. 25.07.01; опубл. 10.07.03 // Изобретения. — 2003. — № 23.
28. Пат. 2220765 РФ, МПК В01F 7/26, В28С 5/16. Центробежный смеситель / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, Д. М. Бородулин, Г. Н. Белоусов, С. В. Аверкин. — Заявл. 27.05.02; опубл. 10.01.04 // Изобретения. — 2004. — № 1.
29. Пат. 2263533 РФ, МПК В01F 7/26. Центробежный смеситель / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, А. С. Волков, М. С. Сницарук. — Заявл. 02.11.04; опубл. 10.11.05 // Изобретения. — 2005. — № 31.
30. Пат. 2246343 РФ, МПК В01F 7/26, В28С 5/16. Центробежный смеситель / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, А. С. Волков, А. Н. Жуков, А. Б. Шушпанников. — Заявл. 11.11.03; опубл. 20.02.05 // Изобретения. — 2005. — № 5.
31. Пат. 2255798 РФ, МПК В01F 9/12, В02С 18/08. Смеситель-измельчитель / В. Г. Коротков, С. В. Антимонов, Е. В. Ганин, С. Ю. Соловых. — Заявл. 25.02.03; опубл. 10.07.05 // Изобретения. — 2005. — № 19.
32. Пат. 2246992 РФ, МПК В02С 13/14. Лабораторный измельчитель-смеситель / В. Г. Коротков, Е. В. Ганин, С. В. Антимонов. Заявл. 02.12.03; опубл. 27.02.05 // Изобретения. — 2005. — № 6.
33. Пат. 2254165 РФ, МПК В02С 13/14. Измельчитель-смеситель / В. Г. Коротков, Е. В. Ганин, С. В. Антимонов, С. Ю. Соловых. Заявл. 27.01.04; опубл. 20.06.05 // Изобретения. — 2005. — № 17.
34. Пат. 2259882 РФ, МПК В02С 13/14. Дробилка-смеситель / В. Г. Коротков, Е. В. Ганин, С. В. Антимонов, С. Ю. Соловых. — Заявл. 09.04.04; опубл. 10.09.05 // Изобретения. — 2005. — № 25.

Статья поступила в редакцию 15.04.2010.