**УДК 621.926.3**

# РАЗРАБОТКА НОВОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СУХИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

***канд. техн. наук, доц. А.А. ГАРАБАЖИУ***
***(Белорусский государственный технологический университет, Минск)***

*Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов при снижении их энергоемкости в настоящее время является актуальной задачей для большинства химических, фармацевтических, пищевых и ряда других производств Республики Беларусь. В большинстве случаев данная проблема решается путем реконструкции или модернизации существующего смесительного оборудования или же путем создания и внедрения новых высокоэффективных энергосберегающих машин и аппаратов. На основании анализа специальной научно-технической и патентной литературы представлены основные механизмы и способы смешения сыпучих материалов, определены основные направления интенсификации процесса перемешивания в современных конструкциях смесительного оборудования. Рассмотрены типовые конструкции и принцип действия современных центробежных смесителей, определены их основные достоинства и недостатки. Проанализировав достоинства и недостатки данного типа смесителей, разработана принципиально новая энергосберегающая конструкция роторно-центробежного смесителя с дополнительными вентиляторными лопатками для перемешивания сухих сыпучих материалов.*

**Введение.** В настоящее время процесс приготовления однородных по составу смесей порошкообразных и зернистых материалов применяется во многих отраслях промышленности (химической, строительной, фармацевтической, пищевой, комбикормовой, металлургической и др.). В технологических процессах производства и переработки: пластмасс, удобрений, резинотехнических изделий, бытовой химии, средств защиты растений, красителей, лекарств, химических волокон, строительных материалов и др., смесительные аппараты занимают одно из наиболее 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 большинства перечисленных производств Республики 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 сыпучих материалов.** Согласно исследованиям Ю.И. Макарова [1, 2] *механизм смешения* сыпучих материалов складывается из следующих элементарных процессов: перемещения группы соседних частиц из одного положения в другое (*конвективного смешения*); перераспределения частиц через обновленную границу их раздела (*диффузионного смешения*); скольжения плоскостей в массе материала (*сдвигового смешения*); сосредоточения частиц, имеющих одинаковую массу в соответствующих местах смесителя под действием гравитационных или инерционных сил (*сегрегации*).

На рисунке 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, обусловливающие вид кривой. Точка 2, соответствующая достижению первого минимального значения коэффициента неоднородности ($V_c \to \min$), 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 смешивания 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 [1 – 3]:

- 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.

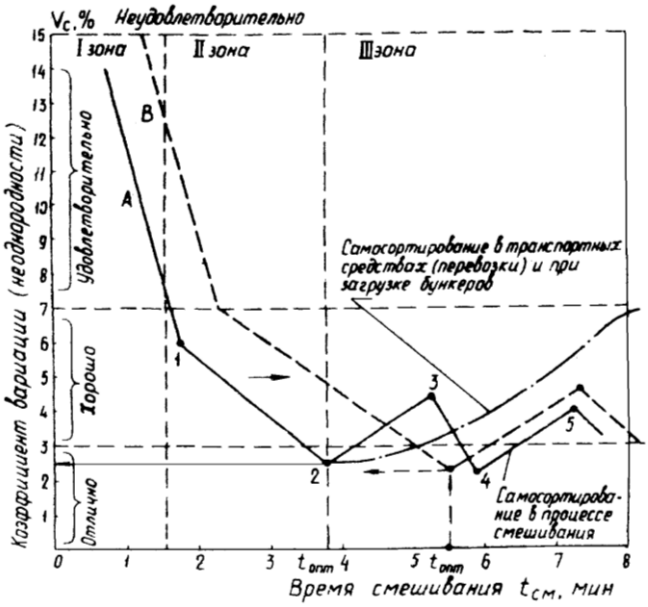


Рис. 1. Зависимость коэффициента вариации ($V_c$) от времени смешения ($t_{см}$):
*A* – кривая смешения сухих компонентов; *B* – кривая смешения сухих компонентов с добавками жидкости;
I – зона сдвигового и конвективного смешения; II – зона конвективного и диффузионного смешения;
III – зона проявления самосортирования (сегрегации)

На ход, длительность и качество процесса смешения влияют многие факторы [1, 2, 4, 5]:

- 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 компонентой (сепарирования, очистки, измельчения);
- стадийность построения процесса – в одну или в несколько стадий;
- общая концепция построения технологического процесса – растянутость коммуникаций, построение бункерного хозяйства и т.д.

Следует отметить также ряд дополнительных соображений, 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 извести 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 1:1000000 – 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 или неоднородности смеси:

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

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

С учетом коэффициента вариации 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 [1 – 7].

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* осуществляется 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* осуществляется 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 конструкционными 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 определенного 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, 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 определенной 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 [1, 2, 6 – 8].

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

- по способу их установки (передвижные или стационарные);
- по характеру протекающего в них процесса смешения (периодического или непрерывного действия);
- по скорости вращения перемешивающего органа (тихоходные или быстроходные);
- по механизму процесса смешения (конвективного смешения, диффузионного или конвективно-диффузионного смешения);
- по способу воздействия на смесь (гравитационные, центробежные или продуваемые);
- по виду перемещения потока частиц (циркуляционные 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 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 классификацию признака [1, 2, 7, 9].

Рассмотрим подробнее **современные конструкции центробежных смесителей для переработки сухих сыпучих материалов.**

В *барабанных смесителях промышленного типа* [1, 6, 9 – 12] 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 псевдоожижением сыпучего материала быстровращающимся ротором. Псевдоожижение слоя твердого сыпучего материала потоком газа сопровождается их интенсивным перемешиванием. Однако использование этого свойства псевдоожиженного слоя для смешения тонкодисперсных материалов в пневматических смесителях крайне затруднительно вследствие возможности каналообразования и расслоения частиц материала в псевдоожиженном слое, а также большого уноса частиц газом и необходимости установки дорогостоящего пылеулавливающего оборудования [13 – 15]. Поэтому пневматические смесители не получили столь широкого распространения в промышленности, как, например, механические смесители.

В *циркуляционных центробежных смесителях* использован принцип перевода сыпучего материала в псевдоожиженное состояние с помощью быстровращающегося ротора. Эксперименты, проведенные Ю.И. Макаровым [1, 2], показали, что псевдоожижение 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 псевдоожиженным слоем подразделяются на лопастные, дисковые, шнековые, с вращающимся конусом и прямоточные. При этом ротор центробежно-лопастного смесителя может быть выполнен в виде лопастной, якорной, турбинной, типа «беличье колесо» мешалок, дисков, прутков и т.д.

На рисунке 2 представлена схема циркуляционного центробежно-лопастного смесителя с пседоожижением 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 днища 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.

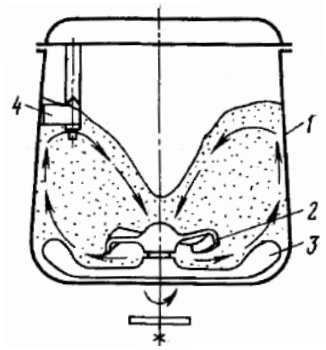

Рис. 2. Принципиальная схема циркуляционного центробежно-лопастного смесителя с пропеллерной мешалкой

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*, которая сообщает массе материала вращательное движение, благодаря чему на частицы начинают действовать центробежные силы и силы кориолисова ускорения. Под действием этих сил частицы материала от центра смесители 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 псевдоожижение, что и при воздействии на него лопастной мешалки. Верхняя мешалка лишь ускоряет продвижение материала к рабочему органу псевдоожижения, т.е. к нижней мешалке *3*. Направляющая лопатка *4* – способствует более быстрому продвижению материала от стенок корпуса *1* к верхней мешалке *2*. Угол атаки

направляющей лопатки выбирают таким, чтобы можно было направить частицы материала от стенки к центру не по спиралям, 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, 3* возникает значительный тепловой эффект. Однако вследствие краткости цикла смешения в таких смесителях материал не успевает разогреться до опасных температур.

Рассмотренный смеситель может обеспечить хорошее качество смешения сыпучих материалов ($V_c$ = 2,5 – 6,0 %) за промежуток времени в 30 мин. Коэффициент заполнения рабочего объема смесителя материалом равен 0,9 [1, 2, 10 – 12]. Примеры новых конструктивных разработок центробежно-лопастных смесителей приведены в работах [16, 17].

Схема *многоярусного центробежно-лопастного смесителя с псевдоожиженным слоем сыпучего материала* представлена на рисунке 3. Данный смеситель состоит из цилиндрического корпуса *1*, в котором соосно установлен вращающийся вал *2*. На валу *2* жестко закреплены три радиальные лопасти *3* прямоугольного сечения с углом наклона плоскости лопасти к горизонту 45°. Лопасти сдвинуты друг относительно друга на 60°. Вал *2* приводится во вращение от электродвигателя *4* через коробку скоростей *5* и редуктор. Коробка скоростей *5* позволяет подбирать оптимальный режим работы смесителя для различных сыпучих материалов, а в пусковые моменты – работать на меньших скоростях вращения лопастей. Подлежащий смешению материал загружается через штуцер *6*, а выгружается после окончания цикла смешения через разгрузочную коробку *7* с задвижкой, из которой материал транспортируется на дальнейшую переработку шнеком *8* с самостоятельным приводом. Установочная мощность электродвигателя *4* равна 22,5 кВт, частота вращения лопастного вала мешалки регулируется в пределах 20…100 об/мин.

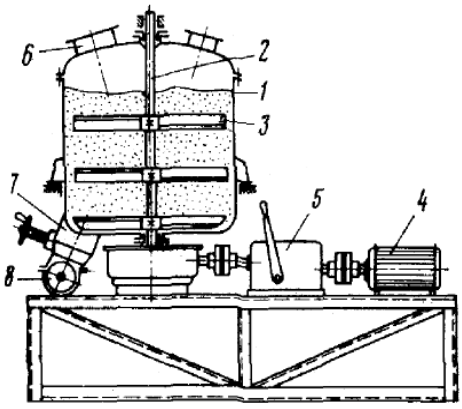

Рис. 3. Схема многоярусного центробежно-лопастного смесителя с псевдоожиженным слоем сыпучего материала

Рассмотренный смеситель может обеспечить высокое качество смешения сыпучих материалов ($V_c$ = 2,0…4,0 %) за относительно короткий промежуток времени ($t$ = 5 мин). При этом удельные энергозатраты на перемешивание составят приблизительно 3,0 – 5,0 кВт·ч/т. Коэффициент заполнения рабочего объема смесителя материалом равен 0,8 [1, 10 – 12, 18]. Примеры новых конструктивных разработок многоярусных центробежно-лопастных смесителей приведены в работах [19 – 21].

В *смесителях с дисковым ротором* псевдоожижение сыпучего материала происходит за счет движения быстровращающегося дискового ротора. На рисунке 4 представлена принципиальная схема циркуляционного центробежного смесителя со сдвоенным дисковым ротором. В цилиндрическом корпусе *1* данного смесителя закреплен ротор, состоящий из верхнего *2* и нижнего *3* дисков, жестко насаженных на верхний конец консольного вала *4*, проходящего сквозь выпуклое днище. Верхний диск *2* – плоский, с прорезями около центра. Нижний диск *3* – сплошной и выполнен по форме днища. Через прорези в верхнем диске материал, загруженный в корпус *1* смесителя, может поступать на нижний диск *3*. Вал *4* приводится во вращение от фланцевого электродвигателя через понижающую клиноременную передачу. Цикл смешения в данном смесителе начинается с момента включения первой наименьшей скорости электродвигателя. При этом засыпанный в корпус *1* смесителя материал начинает постепенно разрыхляться дисками *2* и *3*. По окончании этого пускового периода включается высокая вторая скорость электродвигателя, при которой материал в смесителе приводится дисками *2* и *3* в псевдоожиженное состояние. Вследствие такого двухступенчатого пуска удается избежать максимальных пусковых нагрузок на электродвигатель, которые имели бы место, если бы электродвигатель включили сразу на максимальную скорость вращения. При вращении дисков *2* и *3* на максимальных оборотах материал, за счет сил сцепления и трения, псевдоожижается и его частицы начинают интенсивно циркулировать по внутреннему объему корпуса *1* смесителя. При этом частицы материала, находящиеся на верхнем диске *2*, разбрасываются в горизонтальной плоскости, около стенок кор-

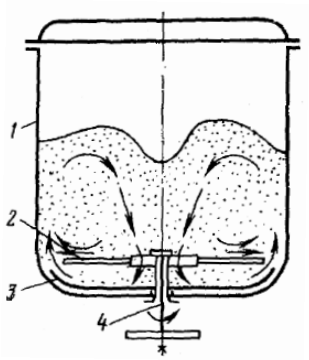

Рис. 4. Принципиальная схема циркуляционного центробежного смесителя со сдвоенным дисковым ротором

пуса *1* они встречаются с частицами, которые приводятся в движение нижним диском *3*. В результате этого частицы материала у стенок корпуса *1* поднимаются вверх, а в центре опускаются вниз. Таким образом, направление циркуляции частиц материала в дисковом смесителе точно такое же, как и в лопастных смесителях. Траектории движения частиц материала в данном смесителе многократно пересекаются как в зазоре между дисками *2* и *3*, так и в пространстве над верхним диском *2*.

В дисковом смесителе (см. рис. 4) из-за трения частиц материала о роторные диски *2* и *3*, стенки корпуса *1* и между собой может выделяться значительное количество тепла. Благодаря короткому циклу смешения ($t$ = 6 мин) в данном смесителе удается избежать повышения температуры материала выше нормы. В случае же, когда смешиваемый материал совсем нельзя нагревать, корпус *1* смесителя снабжают рубашкой, сквозь полость которой пропускают хладагент. Иногда выделяющееся тепло используют для подогрева или подсушки материала в смесителе, а также для проведения реакции в твердой фазе. В этом случае время перемешивания материала может увеличиваться.

Смесители с дисковым ротором используются для сухого смешения поливинилхлоридных композиций, окраски полиэтиленового порошка, увлажнения порошкообразных и зернистых материалов.

Для приготовления композиций термореактивных пресс-порошков смесители этого типа не рекомендуется применять, так как в зазоре между нижним диском и днищем пресс-порошок может уплотняться. В результате этого он может нагреться до температуры, достаточной для необратимых реакций, а при дальнейшем повышении температуры возможно возгорание органического наполнителя.

Рассмотренный дисковый смеситель (рис. 4) может обеспечить хорошее качество смешения сыпучих материалов ($V_c$ = 3,0 – 6,0 %) за относительно короткий промежуток времени ($t$ = 6 мин). При этом удельные энергозатраты на перемешивание составят приблизительно 16 – 25 кВтч/т. Коэффициент заполнения рабочего объема смесителя материалом равен 0,6 [1, 9 – 12]. Примеры новых конструктивных разработок центробежных смесителей с дисковым ротором приведены в работах [22, 23].

В *смесителях со шнековым ротором* псевдоожижение сыпучего материала происходит за счет движения быстровращающегося вертикального шнека конической формы. Принципиальная схема циркуляционного центробежного смесителя с вертикальным шнековым ротором представлена на рисунке 5. В прямоугольном сварном корпусе *1* смесителя, зауженном в нижней части *2*, установлены два смесительных элемента, каждый из которых состоит из двух конической формы шнеков, обращенных меньшими основаниями друг к другу. Смесительные элементы вращаются в одном направлении посредством клиноременной передачи *4* от электродвигателя *3*, закрепленного на верхней части корпуса *1* смесителя.

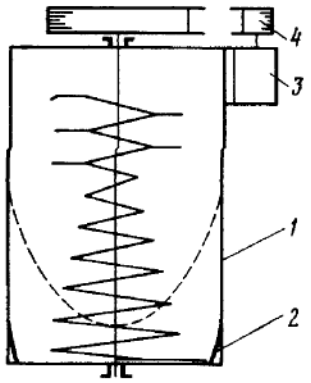

Рис. 5. Принципиальная схема циркуляционного центробежного смесителя со шнековым ротором

Смеситель работает следующим образом. Подлежащий смешению сыпучий материал загружают в корпус *1* смесителя через штуцер, расположенный на крышке аппарата. При включении электродвигателя *3* в массе материала начинают вращаться шнеки, которые создают каждый в своей зоне направленный вверх поток частиц. При этом чем дальше от шнека, тем этот поток был слабее. В местах, наиболее удаленных от шнеков, т.е. в углах корпуса, создается обратный поток частиц смеси, направленный вниз. Таким образом, в смесителях шнекового типа также можно наблюдать интенсивную направленную циркуляцию материала: в зоне действия шнеков материал движется вверх, а по углам – вниз. Каждый виток шнека вследствие малого угла подъема можно рассматривать как плоский диск, способный привести частицы материала в движение подобно дискам смесителя. При этом частицы материала, приведенные в движение витками большего диаметра, двигаются к стенкам корпуса с большей скоростью, чем те частицы, которые перемещаются в непосредственной близости около витков меньшего диаметра. Это явление при наличии внутренней циркуляции способствует энергичному перераспределению частиц смеси между собой, т.е. процессу смешения.

Квадратная форма корпуса смесителя благоприятствует турбулизации потоков материала; в углах корпуса образуются местные зоны обратной циркуляции материала. После окончания процесса смешения готовая смесь выгружается при работающих шнеках через люк с клапаном, расположенный в нижней части корпуса *1*. Смеситель может обеспечить хорошее качество смешения сыпучих материалов ($V_c$ = 4,0 – 7,0 %) за относительно короткий промежуток времени ($t$ = 3 – 12 мин), который зависит от физико-механических свойств смешиваемых компонентов. При этом удельные энергозатраты на перемешивание составят приблизительно 10 – 18 кВтч/т. Коэффициент заполнения рабочего объема смесителя материалом равен 0,5 [1, 9]. Примеры новых конструктивных разработок центробежных смесителей со шнековым ротором приведены в работах [24 – 26].

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 рисунке 6.

Основным рабочим элементом данного смесителя является полый усеченный конус *1*, установленный в корпусе *2*. Верхняя часть корпуса *2* выполнена цилиндрической, а нижняя – конической формы. Конус *1* крепится на консольном валу *3*, который пропущен внутрь корпуса *2* либо через его днище (нижний привод), либо через крышку смесителя *4*. К нижней части конуса *1* жестко прикреплена радиальная лопастная мешалка *5*, угол 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 в нем сыпучих продуктов 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 вовлекаться во вращение. Частицы материала под влиянием возникающих при их вращении центробежных сил инерции движутся 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 псевдоожижения лопастной мешалкой *5*.

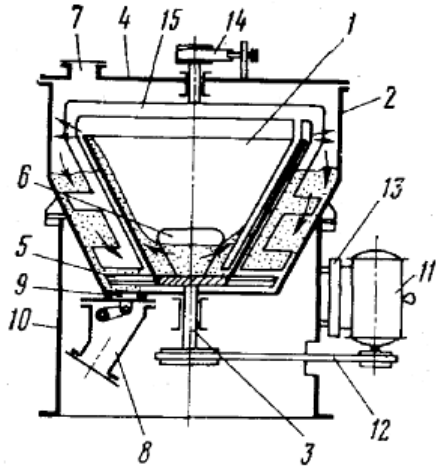

Рис. 6. Схема центробежного смесителя с вращающимся конусом конструкции МИХМа

Для материалов с плохой сыпучестью в корпусе *2* дополнительно устанавливают свободно вращающуюся раму *15* с лопастями и скребком, который входит внутрь конуса *1*. Рама под влиянием сил, действующих со стороны материала на скребок и лопасти, начинает вовлекаться во вращение. Скорость её вращения 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 через окна *6*, а остальная его часть обтекает их. Возникающие при этом завихрения способствуют более интенсивному протеканию процесса смешения. Величина коэффициента неоднородности смеси ($V_c$), 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 очень высокое качество смешения ($V_c$ = 2,0…5,0 %) легких порошкообразных и сыпучих материалов с большой разностью плотностей частиц за небольшой промежуток времени ($t$ = 5…10 мин) [1, 2, 4, 5, 12, 27]. Примеры новых конструктивных разработок центробежных смесителей с вращающимся конусом приведены в работах [28 – 32].

В производстве строительных материалов и в 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 рисунке 7. 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 накидными болтами с барашковыми гайками. Для осмотра и чистки ротора корпус *1* легко снимается и становится на место. К крышке корпуса жестко прикреплены три литых стойки. В загрузочных штуцерах *7* имеются пазы для заслонок, кото-

рыми 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 подаются 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.

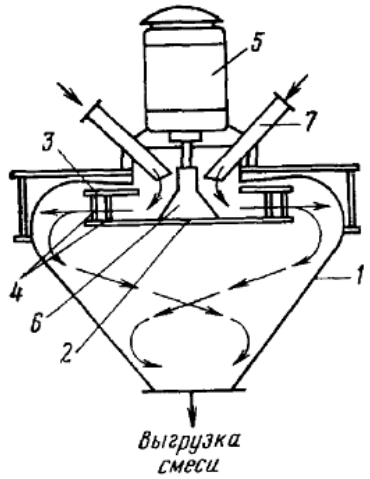

Рис. 7. Схема прямоточного центробежно-ударного смесителя непрерывного действия

Рассмотренный смеситель может обеспечить хорошее качество смешения сыпучих материалов ($V_c$ = 4,0 – 8,0 %) за относительно короткий промежуток времени ($t$ = 0,1 – 0,2 мин) и при относительно небольших энергозатратах (0,1 − 0,15 кВт·ч/т) [1, 9, 11, 12]. Примеры новых конструктивных разработок центробежных смесителей-диспергаторов приведены в работах [33 – 35].

*Достоинства центробежных смесителей*:

- хорошее качество смешения сыпучих материалов (даже легких порошкообразных и с большой разностью плотностей);
- большая удельная производительность по готовой смеси;
- возможность совмещения в одном аппарате нескольких процессов (например, 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).

*Недостатки центробежных смесителей*:

- большие динамические нагрузки на рабочие органы и опорные узлы аппарата;
- большой износ рабочих органов и корпуса аппарата;
- невозможность смешения 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 для перемешивания сухих сыпучих материалов.** Проанализировав достоинства, недостатки и возможные способы модернизации или реконструкции современных центробежных смесителей, на кафедре «Машины и аппараты химических и силикатных производств» Белорусского государственного технологического университета нами был разработан ряд принципиально новых энергосберегающих конструкций роторно-центробежных смесителей для перемешивания сухих сыпучих материалов.

Типовая конструкция энергосберегающего роторно-центробежного смесителя с дополнительными вентиляторными лопатками представлена на рисунке 8. Данный смеситель работает следующим образом. После запуска электродвигателя *15*, установленного на плоской крышке *10*, приводится во вращение через вертикальный вал *7* горизонтальный ротор смесителя. Одновременно с этим через наклонный патрубок *11* в плоской крышке *10* внутрь корпуса аппарата нагнетается воздух и при помощи дополнительно установленного питателя на распределительный конус *8* ротора смесителя подается первый (основной) компонент смеси. После схода с распределительного конуса *8* частицы первого компонента смеси попадают на нижний диск *3* вращающегося ротора и, двигаясь по диску *3* и вдоль плоских разгонных лопаток *5*, под действием центробежной силы разбрасываются последними на периферию к плоской стенке цилиндрической обечайки *1* корпуса смесителя (см. рис. 8, разрез Б − Б). При этом за счет наклона разгонных лопаток *5* к радиусу аппарата на определенный угол 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. Угол наклона разгонных лопаток *5* к радиусу аппарата регулируется при помощи специального механизма *9*. Одновременно с подачей основного компо-

нента смеси, за счет вращения горизонтального ротора с неподвижными вентиляторными лопатками *6*, жестко закрепленными в строго радиальном направлении на нижнем диске *3* со стороны конической обечайки *2* (см. рис. 8, разрез Г – Г), внутри корпуса аппарата создается разряжение воздуха, что способствует самопроизвольному нагнетанию внутрь корпуса смесителя через тангенциальные патрубки *12*, смонтированные на одном уровне в верхней части цилиндрической обечайки *1* и на некотором расстоянии от верхнего диска *4* горизонтального ротора, дополнительных (например, второго, третьего и четвертого) компонентов смеси в заданных пропорциях (см. рис. 8, вид А). Более точное дозирование дополнительных компонентов смеси обеспечивается установкой дозирующих заслонок *13* на тангенциальных патрубках *12*. Так как тангенциальные патрубки *12* расположены на одном уровне и выполнены в форме сужающихся к выходу сопел, имеющих прямоугольное выходное отверстие с существенным преобладанием его высоты (*h*) над шириной (*b*) (см. рис. 8, вид В), то подаваемые через них дополнительные компоненты смеси поступают внутрь корпуса аппарата по касательным траекториям тонкими (толщиной 3 – 5 мм), накладывающимися один на другой слоями смешиваются с летящими к ним по касательной траектории частицами основного компонента смеси и перемещаются все вместе по спиралеобразной траектории вдоль стенок цилиндрической *1* и конической *2* обечаек корпуса смесителя сверху вниз к патрубку *14* выгрузки готовой смеси.

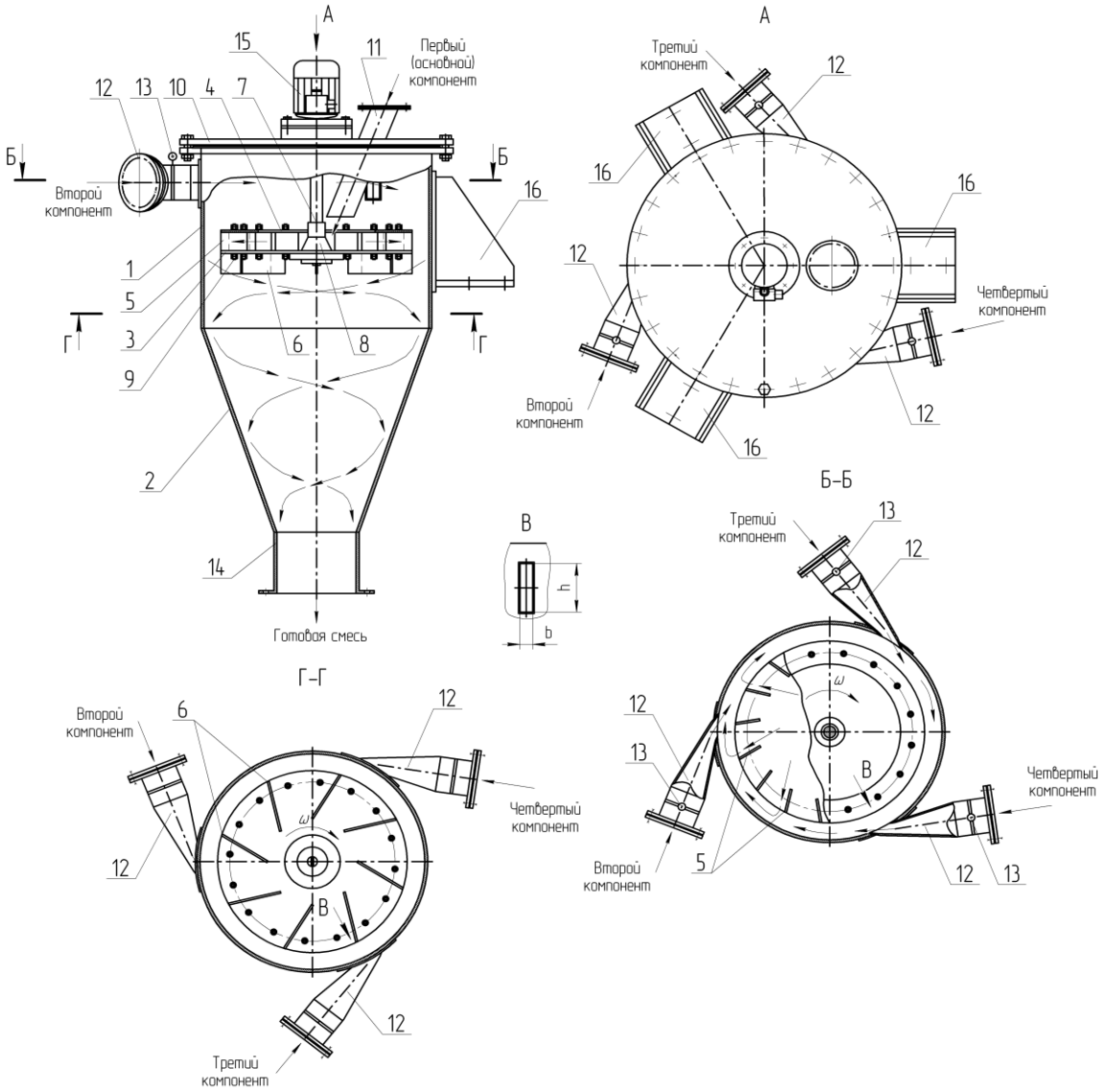


Рис. 8. Роторно-центробежный смеситель с дополнительными вентиляторными лопатками

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 пере-

мешивание 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.

Исходя из того, что процесс перемешивания в роторно-центробежном смесителе (см. рис. 8) 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, в данном смесителе можно прогнозировать достаточно высокое качество перемешивания 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.

**Заключение.** На основании всестороннего анализа специальной научно-технической и патентной литературы 1) определены основные направления интенсификации процесса перемешивания в современных конструкциях смесительного оборудования; 2) рассмотрены типовые конструкции и принцип действия современных центробежных смесителей; 3) выявлены основные достоинства и недостатки данного типа смесителей; 4) разработана новая энергосберегающая конструкция роторно-центробежного смесителя с дополнительными вентиляторными лопатками для перемешивания сухих сыпучих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.
2. Макаров, Ю.И. Основы расчета процессов смешения сыпучих материалов. Исследование и разработка смесительных аппаратов: дис. … д-ра техн. наук: 05.04.09 / Ю.И. Макаров. – М., 1975. – 342 с.
3. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы интенсификации технологических процессов в дисперсных системах / Н.Б. Урьев. – М.: Знание, 1980. – 64 с.
4. Борисов, А.В. Интенсификация перемешивания в аппаратах с использованием решетки крылатого профиля: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.17.08 / А.В. Борисов; Моск. гос. ун-т инж. экологии. – М., 2003. – 16 с.
5. Иванец, Г.Е. Интенсификации процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.18.12 / Г.Е. Иванец; Кемеров. технол. ин-т пищ. пром-сти. – М., 2001. – 52 с.
6. Генералов, М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: учеб. пособие для вузов / М.Б. Генералов. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.
7. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
8. Смешение полимеров / В.В. Богданов [и др.]. – Л.: Химия, 1979. – 192 с.
9. Макаров, Ю.И. Новые типы машин и аппаратов для переработки сыпучих материалов / Ю.И. Макаров, А.И. Зайцев. – М.: МИХМ, 1982. – 75 с.
10. Конструирование и расчет машин химических производств / Ю.И. Гусев [и др.]; под общ. ред. Э.Э. Кольмана-Иванова. − М.: Машиностроение, 1985. − 408 с.
11. Варенных, Н.М. Химико-технологические агрегаты смешивания дисперсных материалов / Н.М. Варенных. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2000. – 340 с.
12. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / М.Б. Генералов [и др.]; под общ. ред. М.Б. Генералова. − М.: Машиностроение, 2004. − Т. IV – 12: Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. – 832 с.
13. Розумов, И.М. Псевдоожижение и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Розумов. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
14. Черняев, Н.П. Пневматическое смешение, состояние и перспективы использования в технологии производства комбикормов. Обзорная информация / Н.П. Черняев, Ю.Д. Гавриченков, В.Л. Свердлов. – М.: ЦНИИТЭИ, 1989. – 48 с.
15. Росляк, А.Т. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии / А.Т. Росляк, Ю.А. Бирюков, В.Н. Пачин. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1990. – 272 с.
16. Смеситель для приготовления формовочной смеси: пат. 2284875 РФ, МПК B22C 5/04 / Н.И. Бех, В.Н. Волков, А.А. Волкомич, Г.И. Дегтяренко, Р.Р. Лутц; заявл. 27.04.05; опубл. 10.10.06 // Изобретения. – 2006. – № 28.
17. Дезинтегратор: пат. 2168361 РФ, МПК B02C 13/22 / В.С. Севастьянов, В.В. Гендриксон, С.А. Михайличенко; заявл. 24.02.99; опубл. 04.08.01 // Изобретения. – 2001. – № 5.
18. Бочаров, В.С. Смесительные установки двухэтапного перемешивания / В.С. Бочаров, А.Б. Артюшин. – М.: Машиностроение, 2000. – 378 с.

19. Смеситель-измельчитель: пат. 2255798 РФ, МПК B01F 9/12, B02C 18/08 / В.Г. Коротков, С.В. Антимонов, Е.В. Ганин, С.Ю. Соловых; заявл. 25.02.03; опубл. 10.07.05 // Изобретения. – 2005. – № 19.
20. Лабораторный измельчитель-смеситель: пат. 2246992 РФ, МПК B02C 13/14 / В.Г. Коротков, Е.В. Ганин, С.В. Антимонов; заявл. 02.12.03; опубл. 27.02.05 // Изобретения. – 2005. – № 6.
21. Измельчитель-смеситель: пат. 2254165 РФ, МПК B02C 13/14 / В.Г. Коротков, Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых; заявл. 27.01.04; опубл. 20.06.05 // Изобретения. – 2005. – № 17.
22. Смеситель для порошков: пат. 2286843 РФ, МПК B01F 7/04, B01F 15/00 / 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.
23. Михайличенко, С.А. Роторно-центробежный агрегат комплексного динамического воздействия на материал: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.13 / С.А. Михайличенко; Белгород. гос. технол. акад. строит. материалов. – Белгород, 2002. – 24 с.
24. Сиваченко, Л.А. Разработка смесителей с тороидно-винтовыми рабочими органами и определение их основных параметров: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.04 / Л.А. Сиваченко; Могилев. машиностроит. ин-т. – М., 1985. – 20 с.
25. Спирально-шнековый смеситель-разбрасыватель минеральных удобрений: пат. 2244395 РФ, МПК 7A 01 G 15/08 / В.П. Забродин, И.Г. Пономаренко, С.Б. Панев; заявл. 13.01.04; опубл. 10.01.05 // Изобретения. – 2005. – № 2.
26. Смеситель шнековый: пат. 2290986 РФ, МПК B01F 7/08, B29B 7/42 / А.Ш. Либерман; заявл. 15.03.05; опубл. 10.01.07 // Изобретения. – 2007. – № 1.
27. Ким, В.С. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В.С. Ким, В.В. Скачков. – М.: Химия, 1988. – 240 с.
28. Зверев, В.П. Разработка циркуляционных смесителей центробежного типа для получения комбинированных продуктов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.04; 05.18.12 / В.П. Зверев; Кемеровский технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2003. – 16 с.
29. Жуков, А.Н. Разработка непрерывно действующего смесительного агрегата и исследование процесса приготовления сухих смесей при высоких соотношениях смешиваемых компонентов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12 / А.Н. Жуков; Кемеровский технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2004. – 16 с.
30. Волков, А.С. Разработка и исследование непрерывно действующего смесительного агрегата с направленной организацией движения материальных и воздушных потоков для получения сухих комбинированных смесей: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12 / А.С. Волков; Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2005. – 17 с.
31. Виниченко, М.М. Разработка и исследование центробежного смесителя непрерывного действия для получения дисперсных комбинированных продуктов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12 / М.М. Виниченко; Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2006. – 18 с.
32. Бакин, И.А. Интенсификация процессов смешения при получении комбинированных продуктов в аппаратах центробежного типа: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.18.12 / И.А. Бакин; Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2009. – 34 с.
33. Маньянов, В.И. Разработка и исследование центробежного смесителя-диспергатора с направленной организацией движения потоков для переработки сыпучих материалов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12 / В.И. Маньянов; Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2006. – 16 с.
34. Чечко, С.Г. Разработка и исследование центробежного смесителя-диспергатора периодического действия для получения дисперсных комбинированных продуктов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.12 / С.Г. Чечко; Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти. – Кемерово, 2009. – 16 с.
35. Дробилка-смеситель: пат. 2259882 РФ, МПК B02C 13/14 / В.Г. Коротков, Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых; заявл. 09.04.04; опубл. 10.09.05 // Изобретения. – 2005. – № 25.

*Поступила 29.04.2010*

## DEVELOPMENT OF NEW ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF ROTARY-CENTRIFUGAL MIXER FOR MIXING DRY GRANULAR MATERIALS

***A. GARABAZHIU***

*And now intensification of mixing of dry bulk materials while reducing their energy consumption is an important task for the majority of chemical, pharmaceutical, food and some other productions of the Republic of Belarus. In most cases, this problem is solved by the reconstruction or modernization of existing mixing equipment, or by creating and introducing new high-efficiency energy-saving machines and devices. Based on the analysis of special scientific-technical and patent literature in the article presents the basic mechanisms and methods of mixing loose materials, the basic directions of intensification of the mixing process in the modern designs mixing equipment. Considered in detail the model structure and operation principle of modern centrifugal mixers identified their main advantages and disadvantages. The advantages and disadvantages of these type mixers, the*

*author has developed a fundamentally new energy-saving design of centrifugal rotary mixer with additional fan blades for mixing the dry bulk materials, construction and operation principle is presented in detail in this article.*