УДК 66.063.622.002.2

В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Г.Е. Иванец

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ И ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СУХИХ, УВЛАЖНЕННЫХ И ЖИДКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

Обобщен опыт разработки нового поколения центробежных смесителей и технологий смешивания при получении сухих и увлажненных комбинированных продуктов. Представлено аналитическое исследование гидродинамики потоков, на основе чего получены зависимости коэффициента мощности роторно-пульсационного аппарата при ламинарном и турбулентном режимах и их обобщенная энергетическая характеристика.

Гомогенизация, диспергирование, смешивание, интенсификация, аппарат, комбинированные смеси.

Введение

В ряде отраслей народного хозяйства, в том числе в пищевой, комбикормовой, химической и других, от исхода операций переработки дисперсных сыпучих материалов зависит качество готового продукта. Однако в пределах каждой конкретной области различные методы получения и переработки дисперсных систем зачастую основаны на традиционных приемах и методах, которые совершенствуются в основном эмпирическим путем. Аппараты, традиционно используемые, не устраивают промышленность по целому ряду причин, в первую очередь по конечному качеству продукта, производительности, энергоемкости и другим параметрам.

Технология производства комбинированных продуктов питания и полуфабрикатов зачастую предусматривает в своей основе процессы получения смесей с высоким соотношением смешиваемых компонентов, что является непростой инженерной задачей. Анализ существующих конструкций смесителей дисперсных материалов показал, что многие из них не удовлетворяют всем предъявляемым требованиям. Но при всех прочих равных условиях использование механических смесителей центробежного типа рассматривается наиболее предпочтительным. Данные аппараты, имеющие высокую производительность при малых габаритах и энергоемкости, позволяют получать смеси хорошего качества. Возможность усовершенствования имеющихся конструкций открывает широкие перспективы для конструирования с целью повышения интенсивности их работы.

Перспективными направлениями при переработке дисперсных материалов являются: интенсификация процесса смешивания за счет турбулизации и циркуляции потоков; аппаратурное оформление стадии смешивания по непрерывной схеме; разработка нового поколения центробежных смесителей, обеспечивающих смешивание в тонких, разреженных, пересекающихся слоях с организацией направленного движения опережающих и рециркулирующих материалопотоков; возможность совмещения в одном аппарате процессов смешивания и диспергирования, что позволяет получать качественные смеси при больших соотношениях исходных компонентов. Последнее является одним из основных преимуществ данного типа оборудования и представляет большой практический интерес для пищевой и ряда других отраслей промышленности.

Российскими и зарубежными учеными (Ю.И. Макаров, Ф.Г. Ахмадиев, А.И. Зайцев, В.В. Кафаров, В.Н. Иванец, В.Д. Харитонов, Ю.Т. Селиванов, R.G. Gibilaro и др.) опубликован ряд исследований в области разработки теории и практики процессов смесеприготовления. Однако, несмотря на возрастающую роль процессов смешивания в пищевой и смежных технологиях, исследованиям смесительных агрегатов центробежного типа посвящено сравнительно небольшое количество работ.

Гомогенизаторы, используемые в настоящее время на большинстве пищевых предприятий, морально и физически устарели, металло- и энергоемки и во многих случаях не способны обеспечить надлежащее качество смеси, особенно высоковязких и плохотекучих компонентов. Поэтому для интенсификации процессов гомогенизации и диспергирования необходимо использовать такие пути и подходы, которые позволяли бы увеличить турбулизацию и циркуляцию потоков при одновременном снижении энергопотребления и металлоемкости, в частности, звуковые, акустические ($20–2\cdot10^4$ Гц), упругие колебания. Для генерирования звуковых колебаний целесообразно применять роторно-пульсационные аппараты (РПА). В них эффективное гидромеханическое диспергирование осуществляется путем периодического прерывания потока, происходящего из-за вращения ротора, размещенного коаксиально статору; в рабочих поверхностях ротора и статора выполнены каналы для протекания обрабатываемой среды.

Теоретические и экспериментальные исследования РПА провели отечественные ученые В.И. Биглер, М.А. Балабыдкин, А.М. Балабышко, А.А. Барам, Л.Г. Базадзе, Г.Ю. Будко, П.П. Дерко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий, В.Н. Фридман, В.Ф. Юдаев и многие

другие. Зарубежные ученые, внесшие наибольший вклад в теорию и практику гидромеханического диспергирования: П. Виллемс, А. Трейбер, П. Кифер, Е. Руд, П. Шеррат, Д. Стауффер, К. Яманато, И. Накам и другие. Однако вопросы математического описания гидродинамики вихревых потоков в рабочих зонах РПА при их ламинарном и турбулентном режимах течения и расчета его энергопотребления изучены недостаточно.

Целью работы является обобщение опыта разработки нового поколения центробежных смесителей и технологий смешивания при получении сухих и увлажненных комбинированных продуктов, исследование эффективности применения РПА в производстве жидких комбинированных смесей с целью интенсификации процессов гомогенизации и диспергирования.

Объекты и методы исследований

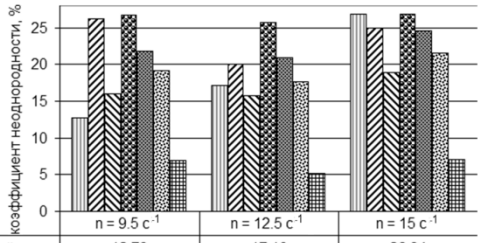
Проведенный анализ комплексных методов интенсификации процесса смешивания выявил два возможных пути: конструктивное совершенствование известных аппаратов и разработка нового поколения центробежных смесителей.

Первый путь предложено реализовать за счет определения рациональных параметров работы аппаратов и усовершенствования их рабочих органов.

Влияние конструктивных и технологических параметров работы смесеприготовительных агрегатов центробежного типа на процессы смешивания изучалось на комплексе стендовых лабораторных установок и в условиях действующих производств. В исследованиях в качестве ключевого компонента использовался ферромагнитный порошок ПЖ1ВМ1 ГОСТ 9894, а для контрольных экспериментов – химически чистая поваренная соль (дисперсность 5÷100 мкм).

С целью оценки влияния конструкции ротора на качество приготавливаемых смесей исследовалось влияние внутреннего *X*1, среднего *X*2, внешнего *X*3 конусов, а также их совместное воздействие. Результаты исследований при соотношении компонентов смеси 1:100 и различной частоте вращения ротора *n* показаны на рис. 1. Корреляционный анализ данных показал, что наибольшее влияние оказывает сочетание всех трех конусов независимо от частоты вращения ротора. Это может быть объяснено тем, что время пребывания частиц в аппарате в этом случае больше, также сказывается дополнительное перераспределение материалопотоков на поверхности конусов. Нами выявлено, что при увеличении количества конусов на роторе более трех значительного улучшения качества смеси не происходит.

В центробежных СНД при движении частиц по поверхности вращающегося гладкого ротора обеспечивается эффективное радиальное смешивание по сечению. Увеличить степень продольного смешивания можно за счет организации движения части материалопотоков вдоль оси аппарата в прямом (опережающем) или обратном направлениях. В модернизированных конструкциях этот способ реализуется при опережающем перетоке частиц через отверстия и перепускные окна, выполненные на поверхности конусного ротора. Рецикл материалопотока осуществляется за счет установки внутри аппарата различного вида устройств (рис. 2), выполненных, например, в виде спирали Архимеда (патент РФ № 2132725), отражателей с торовой поверхностью (патент РФ № 2177362) или в виде колец (патенты РФ № 2177823, 2207186, 2191063, 2207901).



	n = 9.5 с$^{-1}$	n = 12.5 с$^{-1}$	n = 15 с$^{-1}$
X1 – внутренний конус	12,79	17,10	26,84
X2 – средний конус	26,29	20,01	24,92
X3 – внешний конус	16,03	15,79	18,95
X1´X2	26,78	25,69	26,85
X1´X3	21,76	20,93	24,58
X2´X3	19,17	17,60	21,58
X1´X2´X3	6,95	5,17	7,01

Рис. 1. Влияние конструктивных параметров ротора на качество смешивания

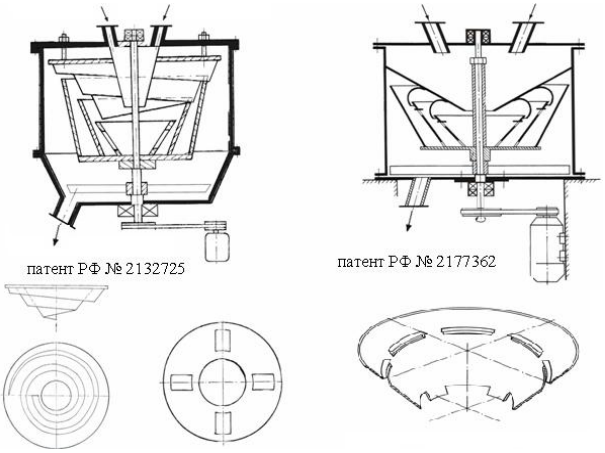


Рис. 2. Центробежные смесители с рециркулирующим устройством

Для определения рациональных геометрических параметров трехконусного ротора исследовано влияние на качество смешивания сухих дисперсных материалов углов конусности (α_1°, α_2°) и размеров окон малого (F_1, мм^2) и среднего (F_2, мм^2) конусов. Опыты проводились по приготовлению смесей (соотношение 1 к 20 ферромагнитного трассера и сухого молока) с учетом рандомизации их во времени во избежание систематических ошибок. Регрессионная модель (коэффициент множественной корреляции R^2 равен 91,3 %) имеет вид:

$$V_c = 9{,}51 - 0{,}192 \cdot \alpha_2 - 0{,}303 \cdot F_1 + \\ + 0{,}115 \cdot F_2 + 0{,}0014 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 + 0{,}0037 \cdot \alpha_1 \cdot F_1. \quad (1)$$

После обработки результатов опытов выявлено, что отдельное воздействие каждого исследуемого

параметра соответствует положительной корреляции с откликом, а угол конусности α_1 не оказывает на него значимого влияния.

Исследовано влияние величины рециркулирующего потока на качество смеси в модели аппарата (патент РФ № 2132725), где в качестве варьируемых параметров приняты частота вращения ротора и положение отражателя: верхнее (минимальный рецикл); среднее; нижнее (максимальный рецикл). Результаты приведены на рис. 3. Их анализ показывает, что качество смеси улучшается при возрастании величины рециркулирующего потока и частоты вращения ротора вплоть до значения, равного 8 $с^{-1}$.

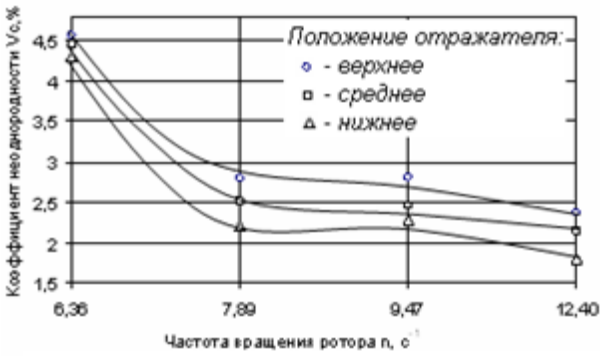


Рис. 3. Зависимость качества смешивания от величины рециркулирующего потока

Новые конструкции смесителей разработаны на основе концепции организации направленного движения материальных потоков в рабочем объеме аппарата. Для увеличения удельной поверхности контакта фаз и уменьшения энергозатрат движение материала осуществляется в тонкослойных и разреженных потоках. Эти идеи использованы при проектировании многокаскадных конусных роторов, размещенных в горизонтальной плоскости (патенты РФ № 2132725, 2177362, 2177823, 2207186, 2216394).

Центробежные смесители с конусным ротором при определенных геометрических и режимных параметрах обладают хорошей диспергирующей способностью. Диспергирование частиц происходит во время их движения по поверхности конусов, в момент прохождения через отверстия в роторе, при соударении между собой, корпусом аппарата и другими препятствиями, а также за счет быстровращающихся разгрузочных лопастей с режущими кромками. В основе создания конструкций смесителей-диспергаторов (патенты РФ № 2159147, 2117525, 2191063, 2207901) лежит идея, что совмещение нескольких способов силового воздействия на перерабатываемые материалы в одном аппарате связано с эффектом механической активации, что в итоге позволяет повысить качество смеси.

Улучшение качества смешивания и повышение диспергирующей способности достигаются в случае, когда конструкция ротора обеспечивает движение частиц во встречных пересекающихся потоках. Данная идея реализована в конструкции непрерывнодействующего центробежного смесителя-диспергатора с двумя конусными роторами, вращающимися в разных направлениях (патент РФ № 2220765). Проведены экспериментальные исследования опытно-промышленной модели СНД на материалах, входящих в рецептурный состав крупяных завтраков. Изучалось влияние на процесс диспергирования: относительной ширины окон на внутреннем конусе φ (отношение ширины перепускных окон L к дисперсности частиц d); степени рециркуляции материала с внешнего конуса на внутренний K, %; разрушающего напряжения измельчаемого материала σ_P, МПа. Полный факторный эксперимент 3^3 проводился при постоянном значении окружной скорости внутреннего ротора, равной 30 м/с, так как при больших значениях наблюдается уплотнение материала на поверхности конусов, ухудшается взаимопроникновение компонентов смеси и ее качество. Окружная скорость внешнего конуса принималась равной 8 м/с. Пропускная способность перепускных окон на внутреннем конусе составляла 50 %. В качестве критерия оценки использовали долю измельченного материала V_D, %. Результаты представлены в виде регрессионной модели:

$$V_D = 95{,}99 - 3{,}89 \cdot \varphi + 0{,}527 \cdot K - 0{,}12 \cdot \sigma_p - 0{,}032 \cdot K \cdot \sigma_p - 1{,}88 \cdot \varphi^2 + 0{,}12 \cdot K^2, \%. \quad (2)$$

Из анализа уравнения (2) следует, что наибольшее влияние на процесс диспергирования оказывают относительная ширина окон, а также совместное воздействие степени рециркуляции и разрушающего напряжения материала. Максимальные значения V_D получены при относительной ширине перепускных окон φ от 3 до 5, степени рециркуляции K от 40 до 50 %.

В разработанных конструкциях СНД с вертикальной компоновкой ротора реализуется способ последовательного разбавления при смешивании сыпучих материалов с большой разницей концентраций исходных компонентов (рис. 4). Интенсификация процесса в этом случае достигается за счет разделения входного потока на несколько частей с последующим их пересечением и добавлением исходного компонента в смесь, полученную на верхнем роторе, а также путем создания пересекающихся потоков над конусами с помощью отражателей.

Одним из способов сглаживания флуктуаций входных потоков в СНД является создание в нем буферной накопительной зоны (патент РФ № 2117525), в которой аккумулируется определенный запас смешиваемых компонентов.

Для получения увлажненных смесей хорошего качества из компонентов, которые в процессе хранения и смешивания могут образовывать конгломераты, предложено устанавливать диспергирующие крестообразные лопасти или ножи (патенты № 2117525, 2207901, 2191063).

На модели СНД (патент РФ № 2117525) изучены закономерности процесса смешивания сыпучих материалов с малыми количествами жидких добавок. Исследовалось влияние на качество смеси частоты вращения ротора ($X1$), производительности смеси-

теля ($X2$), соотношения сыпучей композиции и жидкости ($X3$). Опыты проводились на компонентах, входящих в состав стекольной шихты, при введении жидкой добавки (воды) в количестве от 5 до 15 %.

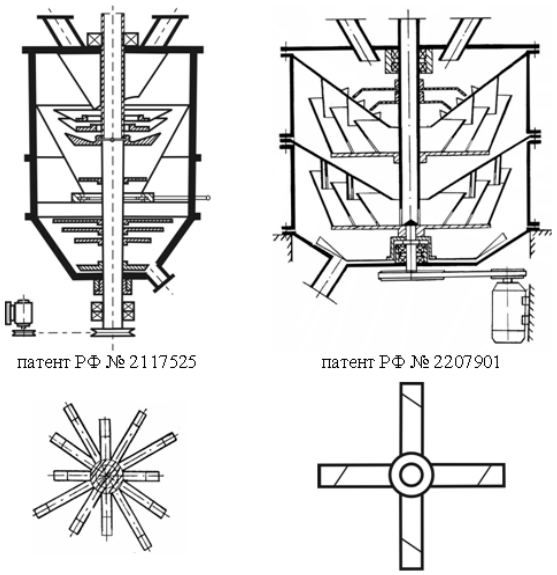


Рис. 4. Смесители-диспергаторы с вертикальной компоновкой ротора

Качество смеси оценивалось равномерностью распределения жидкости по объему. Уравнение множественной регрессии (коэффициент корреляции R^2 равен 89 %) в кодированном виде:

$$Vc = 7{,}45 - 1{,}77 \cdot X1 + 0{,}816 \cdot X2 + 1{,}943 \cdot X3. \qquad (3)$$

По результатам опытов установлены рациональные значения исследованных параметров и проведена оценка эффективности работы СНД с точки зрения энергетических затрат, максимальные значения которых при концентрации жидкой фазы не более 15 % не превысили 300 Вт (удельные энергозатраты 0,47 кВт·ч/м^3).

С целью получения смесей дисперсных порошкообразных материалов с жидкими высоковязкими добавками разработан СНД (патент РФ № 2159147). Процесс смешивания в нем происходит под действием центробежных и сил трения при движении компонентов по поверхности вращающегося диска-распылителя, а также в момент среза смеси со стенок корпуса. Благодаря форме ножей часть смеси возвращается на диск, образуя контур рециркуляции, что уменьшает влияние флуктуаций входных потоков на качество готового продукта.

Выявлено, что при вращении ротора внутри смесителя возникают силы, приводящие к образованию пылегазовых турбулентных потоков. Это явление вызывает нарушение предусмотренных в конструкции аппарата направлений движения материалопотоков и другие нежелательные эффекты, например, сегрегацию. Поэтому нами предложено организовать направленное движение воздушных потоков во внутреннем объеме аппарата за счет введения в его конструкцию дополнительных устройств. Это позволяет интенсифицировать процесс смешивания за счет дополнительной турбулизации и выдувания частиц дисперсного материала из застойных зон, в которых он может накапливаться. Данные идеи реализованы в новых конструкциях СНД. В смесителе (рис. 5) в верхней части корпуса установлен статичный отражатель в виде колец, между которыми размещены изогнутые направляющие. Закрученный пылегазовый поток под действием инерционных и центробежных сил прижимается к поверхности отражателя и затем направляется к центру ротора, где осаждается на внутреннем конусе. Для дополнительной турбулизации на поверхностях среднего и внешнего конусов ротора выполнены тангенциальные отверстия. Изучено их влияние на степень циркуляции материала на роторе при изменении его частоты вращения. С помощью цифрового термоанемометра определены значения скорости воздушного потока для материалов различной сыпучести: для хорошосыпучих – 1,1÷1,5 м/с; плохосыпучих – 1,3÷1,8 м/с; связносыпучих – 1,5÷2,4 м/с.

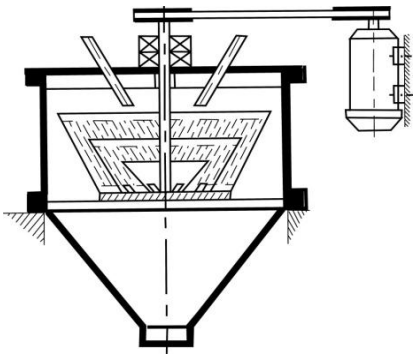
В модернизированной конструкции ротора (патент РФ № 2246343) на внутренней поверхности среднего и внешнего конусов устанавливались спиралевидные направляющие лопасти, за счет которых в объеме аппарата создавалось направленное движение пылевоздушного потока снизу вверх. Анализ полученных экспериментальным путем уравнений регрессии показал, что для получения смесей хорошего качества необходимо выдерживать расстояния между верхним основанием внешнего конуса и крышкой 40÷50 мм, угол установки направляющих лопастей должен составлять 85 % от угла траектории движения материалопотока по поверхности конусов, частоту вращения необходимо выдержать в диапазоне 11,5÷12,5 с$^{-1}$. При соотношении дисперсных компонентов в диапазоне от 1:100 до 1:400 за счет рециркуляции пылевоздушных потоков на каждом конусе ротора качество смеси улучшается в среднем на 3÷3,5 %.

Изучено влияние на качество смешивания осевого нагнетателя, устанавливаемого на роторе (рис. 6) с целью создания движения пылевоздушных потоков сверху вниз. С этой целью на среднем конусе ротора 1 закреплены четыре лопатки рабочего колеса осевого нагнетателя 3, при вращении которых образуется разрежение в области движения опережающих потоков с поверхности внутреннего конуса 2, что способствует лучшему взаимопроникновению частиц. В ходе опытов приготавливались смеси СОМ – ферромагнитный трассер (соотношение 1 к 100) при варьировании частоты вращения ротора n, количества лопаток z и углов их поворота β. Получено регрессионное уравнение:

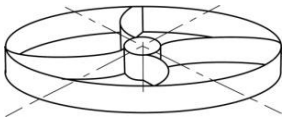
$$Vc = 13{,}054 - 4{,}058 \cdot z - 0{,}221 \cdot \beta + 0{,}084 \cdot n + 0{,}117 \cdot z \cdot \beta + 0{,}091 \cdot z \cdot n + 0{,}009 \cdot n \cdot \beta - 0{,}005 \cdot z \cdot n \cdot \beta. \qquad (4)$$

Анализ его показал, что наличие осевого нагнетателя оказывает наибольшее влияние на качество смешивания при частоте вращения ротора более 8,33 с$^{-1}$. Однако при частоте более 9,5 с$^{-1}$ происходит ухудшение качества смеси, вызванное

переходом высокодисперсных компонентов в пылегазовый поток. Наилучшие результаты достигаются при частоте вращения ротора n = 8,33÷9,5 с$^{-1}$, количестве лопастей z = 4 и углах их поворота β = 45 град.



патент РФ № 2263533

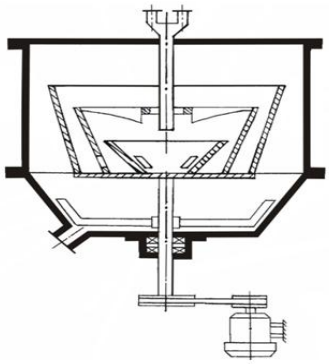


статичный отражатель

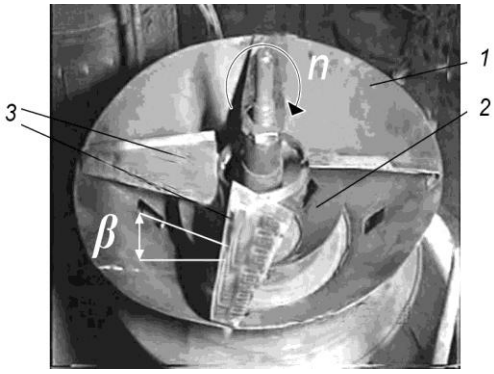
ротор с тангенциальными отверстиями

Рис. 5. Смеситель с направленным движением воздушных потоков

Для реализации совмещенных процессов смешивания – диспергирования кромки окон на роторе и разгрузочных лопастей затачивались. Для создания направленного движения материала во внутреннем объеме аппарата на конусном роторе устанавливались направляющие лопасти (патент № 2311951, рис. 7). В результате материалопоток, толщина слоя которого превышала высоту окон направляющих лопастей, разделялся на три части: первая проходила через окна и двигалась вместе с основным потоком по поверхности ротора; вторая, наталкиваясь на поверхности лопастей, возвращалась к его центру, образуя контур рецикла; третья – через вырезы, выполненные в верхней части лопастей, сбрасывалась на основной поток. При вращении разгрузочной лопасти, размещенной внизу смесителя, материал отогнутыми концами забрасывался навстречу основному потоку на поверхность ротора.



патент РФ № 2216394



ротор с осевым нагнетателем

Рис. 6. Смеситель с осевым нагнетателем

Рис. 7. Смеситель-диспергатор периодического действия

При исследовании работы центробежного смесителя-диспергатора периодического действия изучено влияние частоты вращения ротора (n, с$^{-1}$), времени смешивания (τ, с) и коэффициента загрузки аппарата на качество смеси. Выявлено, что оптимальные условия проведения процесса смесеприготовления находятся в области n = 10÷20 с$^{-1}$; τ = 100÷200 с. При приготовлении композиции муки и поваренной соли (соотношение компонентов до 1 к 300) получена качественная смесь (V_c = 3÷6 %). Влияние коэффициента загрузки аппарата на качество смешивания при частоте вращения n = 20 с$^{-1}$ показано на рис. 8. В ходе исследования диспергирующей способности аппарата, оцениваемой степенью измельчения, установлено, что наибольшее влияние оказывают режущие кромки разгрузочных лопастей и окон конуса.

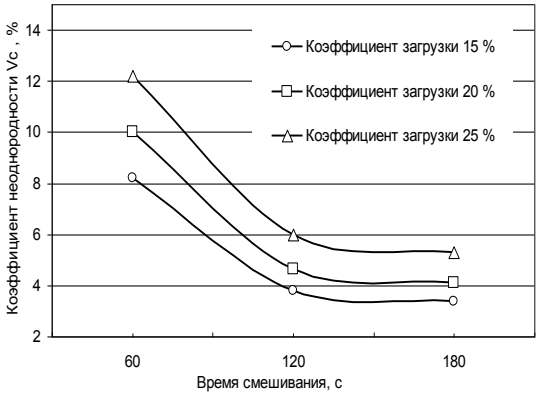


Рис. 8. Зависимость качества смешивания от коэффициента загрузки аппарата

Сравнение удельных энергозатрат разработанных аппаратов и типовых конструкций показало, что первые имеют удельную металлоемкость от 0,094 до 0,125 т·ч/м^3, а удельные энергозатраты от 0,31 до 0,6 кВт·ч/м^3, что примерно в 4÷8 раз меньше аналогичных характеристик серийного оборудования.

Основной технологической операцией при получении регенерированного молока – многокомпонентного ЗЦМ является смешивание сыпучих дисперсных ингредиентов и последующее введение в смесь жидких добавок, в том числе жирофосфатидной композиции. При этом процесс смешивания осложняется ввиду образования устойчивых конгломератов, приводящих к неравномерному распределению компонентов по объему смеси.

С целью усовершенствования технологии нами предложено использовать центробежный СНД (патент РФ № 2159147). При работе аппарата (рис. 9) непрерывно подаются через патрубки 2 жидкий и 3 – сыпучий компоненты в центр вращающегося от приводного вала 5 диска-распылителя 6, где происходит процесс их смешивания. Полученная смесь-полуфабрикат сбрасывается с диска на стенки корпуса 1, оседает на них и на поверхности отражателя 8 (зона I), попадая затем под ударное воздействие режущих кромок ножей 7. В момент ее среза конгломераты разрушаются и происходит интенсивное смешивание сыпучего материала, жидкости и вязкой полидисперсной системы в зоне II.

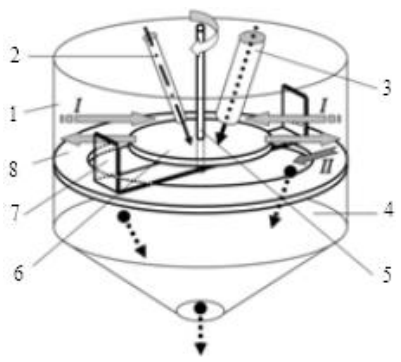


Рис. 9. Схема центробежного смесителя порошкообразных материалов с жидкими добавками

Работоспособность аппарата проверена при приготовлении композиции на основе СОМ с добавлением жидкой смеси жиров и эмульгирующих премиксов. Основной компонент (СОМ) подавался в аппарат объемным дозатором производительностью от 4,5 до 10 г/с, а жировая композиция, предварительно подогретая до температуры 40 °С, поступала через дозатор жидкости. Содержание жира в смеси варьировалось от 4 до 20 % и определялось в пробах готового продукта по косвенному методу В.С. Рушковского. В ходе экспериментов исследовалось влияние частоты вращения ротора $X1$, с$^{-1}$ и концентрации жировой фазы $X2$, % на равномерность ее распределения по объему композиции V_c (Y, %). Получено уравнение множественной регрессии (R^2 равно 0,92):

$$Y = 31 - 4{,}8\cdot X1 - 0{,}8\cdot X2 + 0{,}25\cdot X1^2 + \\ + 0{,}05\cdot X1\cdot X2 + 0{,}02\cdot X2^2. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что с увеличением частоты вращения ротора качество получаемой композиции улучшается до некоторого критического значения, а затем ухудшается из-за уменьшения времени пребывания материала в активной зоне. Выявлено, что частота вращения ротора должна лежать в пределах от 6,5 до 10 с$^{-1}$. Увеличение концентрации жировой фазы приводит к ухудшению качества смеси, так как происходит возрастание числа конгломератов. В разработанной конструкции центробежного СНД время смешивания исчисляется в секундах, а коэффициент вариации не превышает 10–15 %.

Нами проведены теоретические исследования гидродинамики потоков в РПА. В целях упрощения анализ осредненного течения среды в кольцевом зазоре РПА (рис. 10) выполнен с позиции осесимметричного вихревого потока эффективно-вязкой жидкости (течение типа Куэтта), осложненного равномерным радиальным вдувом.

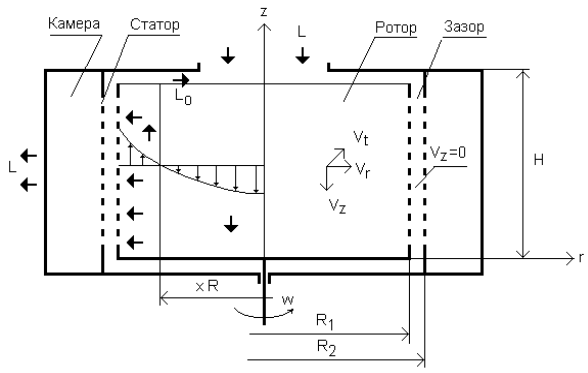


Рис. 10. Расчетная схема и поток в роторе РПА

Ввиду малой величины зазора ротор и статор представлены бесконечными проницаемыми соосными цилиндрами (краевые эффекты не учитывались). Исходная система уравнений движения жид-

кости в зазоре в цилиндрической системе координат r, z и φ представлена в виде:

$$V_r \frac{dV_r}{dr} - \frac{V_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho}\frac{dP}{dr} + \nu_{эф}\left(\frac{d^2V_r}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dV_r}{dr} - \frac{V_r}{r^2}\right)$$

$$V_r \frac{dV_\varphi}{dr} - \frac{V_r V_\varphi}{r} = \nu_{эф}\left(\frac{d^2V_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dV_\varphi}{dr} - \frac{V_\varphi}{r^2}\right) \quad (6)$$

где V_r, V_φ – радиальная и окружная компоненты скорости; P – давление; r – текущий радиус.

Уравнение неразрывности в интегральной форме:

$$V_r = L/(2\pi Hr), \quad (7)$$

где L – объемный расход жидкости, проходящей через зазор. Граничные условия для окружной компоненты заданы соотношениями: при $r = R_1$, $V_\varphi = \beta\,\omega\,R_1$; при $r = R_2$, $V_\varphi = \alpha\,\omega\,R_2$.

Соответствующий выбор коэффициентов скольжения α и β позволяет провести анализ структуры межцилиндрового потока для различных вариантов расположения роторного и статорного цилиндров. В работе проанализированы два варианта: А – внутренний роторный и внешний статорный цилиндры; В – внутренний статорный и внешний роторный.

Условие (7) позволяет свести анализ течения жидкости в зазоре к плоской задаче, а исходную систему (6) к виду:

$$\frac{V_\varphi^2 + V_r^2}{r} = \frac{1}{\rho}\frac{dP}{dr}; \quad (8)$$

$$r\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r}\frac{d\Gamma}{dr}\right) = Re_r\left(\frac{1}{r}\frac{d\Gamma}{dr}\right), \quad (9)$$

где $\Gamma = V_\varphi\, r$ – циркуляция окружной компоненты скорости; $Re_r = V_r\, r/\nu_{эф}$ – число Рейнольдса радиального потока.

Первое уравнение описывает изменения давления по радиусу зазора, второе – радиальный профиль окружной компоненты, определяя тем самым сдвиговые напряжения и диссипативные потери в нем. Последнее является определяющим, так как дает возможность анализа структуры ламинарного и турбулентного вихревых течений в зазоре.

Ламинарный режим ($\nu_{эф} = \nu$). В этом случае число Рейнольдса сохраняет постоянное значение, равное $Re_r = L/(2\pi H\nu)$, а уравнение (9) имеет точное аналитическое решение:

$$\frac{V_\varphi}{\omega_г} = \left(\frac{R_1}{r}\right)^2\left(\beta - (\beta - \alpha R)\frac{(r/R_1)^{2kl} - 1}{R^{kl} - 1}\right) \quad (10)$$

где $R = (R_2/R_1)^2$ – относительная величина межцилиндрового зазора; $kl = Re_r/2+1$ – параметр распределения.

Его анализ показывает, что при отсутствии радиального течения ($kl = 1$) профиль окружной скорости в зазоре точно соответствует распределению Куэтта (рис. 11). По мере увеличения интенсивности радиального потока происходит деформация профиля: при вращении внутреннего цилиндра область максимальных окружных скоростей в зазоре расширяется, повышая градиент сдвига вблизи статорного цилиндра; при вращении внешнего цилиндра, наоборот, радиальное течение стремится как бы «прижать» вихревой поток к поверхности ротора.

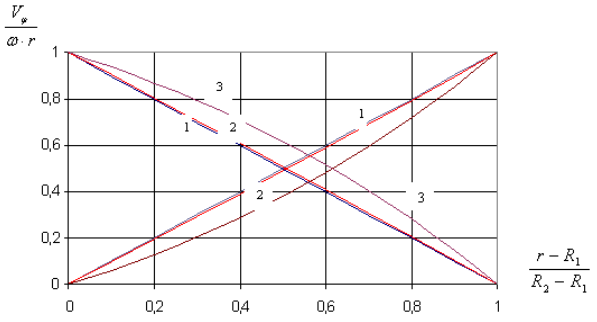


Рис. 11. Профили окружной скорости в зазоре R = 1,01 при ламинарном режиме: 1 – kl = 14; 2 – kl = 10; 3 – kl = 100

Турбулентный режим ($\nu_{эф} = \nu_t$). Сохранение ламинарной структуры вихревого потока в условиях поперечных пульсаций затруднительно и возможно только при высокой вязкости обрабатываемой среды и малых радиальных зазорах. Гораздо чаще в межцилиндровых зазорах возникает турбулентный вихревой режим, осложненный эффектами акустики, гидроудара и кавитации. Для оценки профиля осредненной окружной скорости в зазоре использовано уравнение (9), в котором кинематическая вязкость среды ν заменена турбулентной ν_t. В гипотезе Прандтля о «длине пути смешения»

$$\frac{\nu_t}{\lambda^2} = \left|\frac{1}{r}\frac{d\Gamma}{dr} - \frac{2\Gamma}{r^2}\right| \quad (11)$$

принято допущение, что масштаб турбулентных пульсаций сопоставим с величиной межцилиндрового зазора и сохраняет постоянное значение, т.е.

$$\lambda = \chi(R_2 - R_1),$$

где χ – эмпирическая характеристика, зависящая от геометрии перфораций роторного и статорного цилиндров.

Проведя двойное интегрирование с учетом граничных условий, получим искомое решение:

$$\frac{V_\varphi}{\omega r} = \beta + kt\,ln\sqrt{\frac{r}{R_1}} - \left(\beta - \alpha + kt\,ln\sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\right)\frac{(R_1/r)^2 - 1}{1/R - 1}, \quad (12)$$

в котором параметр kt представлен отношением чисел Рейнольдса: $kt = Re_r / Re_1$. Заметим, что число Рейнольдса $Re_1 = \omega \ell^2/\nu$ показывает соотношение инерционных сил турбулентных пульсаций и сил вязкостного трения, являясь мерой интенсивности турбулентности в зазоре. Анализ выражения (12) показывает, что выбор значения параметра kt в интервале $[0\ldots\infty]$ позволяет моделировать структуру межцилиндрового потока, отражая специфику конструкции и режим работы РПА.

Расчеты, сделанные нами, показывают, что в узких зазорах турбулентный вихревой поток сохраняет свою структуру даже при интенсивном радиальном течении. По мере расширения зазора влияние поперечного потока усиливается. Независимо от граничных условий турбулентный поток всегда сохраняет тенденцию к торможению: с увеличением параметра kt его окружная скорость в зазоре уменьшается, приводя к росту напряжений сдвига вблизи поверхности роторного цилиндра.

Расчет энергозатрат в РПА выполнен методом диссипативных потерь.

Известно, что при движении вязкой несжимаемой жидкости в конечном объеме V количество механической энергии потока N_d, переходящей в тепло в единицу времени, равно:

$$N_d = 2\int_V m_{эф} S V, \qquad (13)$$

где S – диссипативная функция потока в данной области; $\mu_{эф}$ – эффективная вязкость среды. Учитывая, что вихревой поток в зазоре является плоским и симметричным относительно оси вращения, выражение для диссипативной функции:

$$S = \frac{1}{2}\left(\frac{dV_\varphi}{dr} - \frac{V_\varphi}{r}\right)^2 + \left(\frac{dV_r}{dr}\right)^2. \qquad (14)$$

Второе слагаемое, учитывающее потери энергии при расширении потока, в силу малости может быть опущено. После подстановки выражения (14) в интеграл (13) и представления его в безразмерном виде получим:

$$K_N = \frac{N_d}{2\pi\rho\omega^3 H R_1^2 R_2^2} = \int_1^R \frac{\nu_{эф}}{2\omega R_2^2}\left(2x\frac{dU}{dx}\right)^2 dx. \qquad (15)$$

Левая часть интеграла (15) – искомый коэффициент мощности ступени РПА. В общем случае для его нахождения требуется знание распределений окружной скорости и эффективной вязкости в радиальном направлении.

Нами рассмотрено решение интеграла (15) применительно к модификации ступени «внутренний ротор – наружный статор» для ламинарного и турбулентного режимов работы. Определив скорость сдвига в зазоре, используя выражения (10), (12) и выполнив интегрирование уравнения диссипации (15), запишем коэффициент мощности ступени РПА для ламинарного и турбулентного режимов:

$$K_N = C_{lam}(R, kl)\,Re_\omega^{-1}; \qquad (16)$$

$$K_N = C_{tur}(R, kt)\,\chi^2. \qquad (17)$$

Первые множители учитывают влияние расхода на энергозатраты ротора:

$$C_{lam} = \left(\frac{1 - 1/R}{1 - 1/R^{kl}}\right)^2 \left(-\frac{1}{R} + 2\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R^{kl}}\right) + \frac{(kl-1)^2}{2kl-1}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R^{2kl}}\right)\right) \qquad (18)$$

$$C_{tur} = \frac{(\sqrt{R}-1)^2}{128}\left(kt^3\left(1 - \frac{1}{R^4}\right) - \frac{3mkt^2}{2}\left(1 - \frac{1}{R^2}\right) - 3m^2 kt \ln\frac{1}{R} - \frac{m^3(1-R^2)}{2}\right) \qquad (19)$$

где $m = 8/(R-1) + kt/R$.

Анализ выражений (18) и (19) показывает, что при малых расходах коэффициент мощности при ламинарном режиме равен обратной величине окружного числа Рейнольдса, а в режиме развитой турбулентности сохраняет свое постоянное значение, определяемое масштабом поперечных сечений:

$$\text{при } Re_\omega < 10 \quad K_N = Re_\omega^{-1};$$
$$\text{при } Re_\omega > 1000 \quad K_N = \chi^2. \qquad (20)$$

Выражения (20) позволяют упростить определение эмпирической постоянной χ и установление ее связи с конфигурацией прорезей роторного и статорного цилиндров. Опираясь на принцип предельного перехода, обобщенную зависимость критерия мощности от числа Рейнольдса Re_ω можно представить в виде:

$$K_N = C_{lam}(R, kl)\,Re_\omega^{-1} + C_{tur}(R, kt)\,\chi^2. \qquad (21)$$

Действительно, в области малых чисел Рейнольдса определяющим становится первое слагаемое, в то время как при больших – второе.

Типичный вид теоретической кривой мощности с учетом влияния радиального зазора и расхода приведен на рис. 12. Ее характерной особенностью является наличие скачка мощности в переходной области, амплитуда и положение которого зависят от величины межцилиндрового зазора.

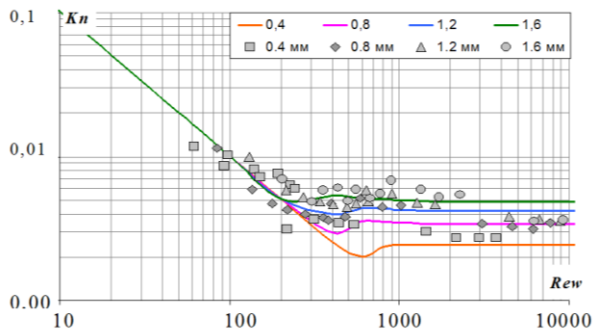


Рис. 12. Зависимость критерия мощности от критерия Рейнольдса при различных зазорах, диаметр ротора 221 мм, модификация «А»

Для описания вихревого течения в полости ротора использована исходная система уравнений Навье – Стокса (6) и неразрывности потока в дифференциальной форме. Решение строилось с использованием аппроксимирующего выражения для осевой компоненты скорости вихря:

$$\frac{V_z}{V_0} = -\frac{z}{H}\left(1 - \left(\frac{r}{xR}\right)^2\right) \qquad (22)$$

Согласно выражению (22) цилиндрическая поверхность $xR(x < 1)$ делит вихревой поток в роторе на две зоны: центральную с нисходящим и периферийную с восходящим осевыми течениями.

Нами анализировались режимы вдува, при которых окружная скорость вращения ротора значительно больше средней скорости радиального потока. В этом случае толщины пограничных слоев, формирующиеся на торцевых поверхностях, пренебрежимо малы по сравнению с размерами центральной вихревой зоны, являющейся объектом нашего анализа. Распределение циркуляции окружной компоненты $\Gamma = V\varphi r$ в этой зоне найдено в результате приближенного решения второго уравнения исходной системы (6):

$$\frac{G}{\omega R^2} = \frac{\left(1 + \left(\frac{r}{xR}\right)^2\right)^{k+1} - 1}{\left(1 + \frac{1}{x^2}\right)^{k+1} - 1}. \qquad (23)$$

Полученное решение (23) позволяет оценить степень влияния радиального потока на профиль и перепад давления в роторе. Безразмерный профиль давления (критерий Эйлера) в роторе оценивался интегралом вида:

$$Eu(r,kt) = \frac{2(P - P_0)}{\rho(\omega R)^2} = \int_0^{r/R}\left(\frac{V_\varphi}{\omega r}\right)^2 d\left(\frac{r}{R}\right)^2. \qquad (24)$$

Во всех случаях отмечена тенденция снижения числа Эйлера по мере увеличения интенсивности вдува среды в ротор.

При движении жидкости во внутренней полости ротора потоку сообщается кинетическая энергия, которая затем частично расходуется на преодоление гидравлического сопротивления системы перфорированных цилиндров ротора и статора, а частично преобразуется в потенциальную энергию давления во внешней камере.

Учитывая условие сохранения энергии и проведя необходимые преобразования, запишем основное уравнение Бернулли для РПА в безразмерном виде:

$$Eu = \frac{2(P_2 - P_1)}{\rho(\omega R)^2} = Eu_p + Eu_c - \xi_{pc}\left(1 + \left(\frac{L}{\omega RFs}\right)^2\right) 2gH/(\omega R)^2, \qquad (25)$$

где $Eu = 2(P_2 - P_1)/(\rho(\omega R)^2)$ – коэффициент давления (число Эйлера); $W = L/(\omega R\ Fs)$ – коэффициент расхода; ξ_{pc} – коэффициент гидравлического сопротивления. Последнее слагаемое характеризует влияние положения входного и выходного патрубков и в случае малой величины может быть опущено. Выражение (25) представляет собой напорно-расходную характеристику РПА в безразмерном виде. Единственным параметром, требующим экспериментального определения, является коэффициент ξ_{pc}.

Нами исследовано влияние двух основных факторов: конструктивных параметров ротора и статора и интенсивности циркуляционного потока. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что влияние расхода на потребление РПА незначительно. Так, во всем диапазоне изменения расхода увеличение мощности при турбулентном режиме не превышало 5–6 %, и только при обработке высоковязких сред, когда вихревой поток в межцилиндровом зазоре оставался ламинарным, оно составило 10–15 %.

Границы переходного режима для всех исследованных зазоров в диапазоне 0,4…2,0 определялись по осредненным координатам первых двух экстремальных точек энергетической характеристики, построенной в координатах K_N – Ta_ω: первое критическое число оказалось равным 25, второе – 50. Более раннее развитие турбуленетности в межцилиндровом зазоре РПА (по сравнению с гладкими цилиндрами, где $Ta_\omega = 41{,}3$) связано с возмущающим воздействием радиального течения и перфорации, которые способствуют образованию локальных вихрей и пульсаций. Найденные значения критических чисел Рейнольдса и параметра эквивалентной шероховатости, введенного нами для оценки степени влияния перфорации ротора и статора на энергопотребление РПА, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Постоянные энергетической характеристики РПА типа «А»

Межцилиндровый зазор, мм	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,0
Первое критическое число Рейнольдса	414,2	337,4	292,6	238,7	206,6	184,6
Второе критическое число Рейнольдса	828,4	674,8	585,2	477,4	413,2	369,1
Параметр экв. шероховатости $\chi^2\ 10^3$	2,414	2,964	3,418	4,189	4,84	5,417

На рис. 12 показаны опытные кривые мощности смесителя с диспергирующей головкой модификации «А» при различных значениях межцилиндрового зазора и режимов ее работы. При сравнении опытных и расчетных характеристик погрешность не превышает 15 %. Некоторое смещение вверх экспериментальных точек объясняется дополнительными затратами энергии на трение торцевых поверхностей ротора. Аналогичные результаты получены и для диспергирующего устройства типа «В».

Как показали результаты исследований, в отличие от энергопотребления величина напора, создаваемая РПА, в существенной степени зависит от интенсивности циркуляционного потока. И при ламинарном, и при турбулентном режимах отмечено снижение напора по мере увеличения интенсивности циркуляции, причем в последнем случае оно более существенно. Результаты обработки экспериментальных данных по напору при нулевом расходе показали, что в турбулентной области коэффициент гидравлического сопротивления роторного и статорного цилиндров сохраняет постоянное значение, равное ξ_{pc} = 0,1±0,01. Найденные значения в первом приближении оказались одинаковыми для обеих исследованных конструкций диспергирующих головок. Установлено также, что коэффициент ξ_{pc} практически не зависит от параметра истечения $K\tau$, а в основном определяется долей «живого сечения» ротора и статора (коэффициентом перфорации Kf).

При условии пропорциональной зависимости турбулентного числа Рейнольдса kt и параметра закрутки вихревого потока ротора W и учитывая то, что гидравлические потери в основном связаны с обтеканием прорезей, уравнение напорно-расходной характеристики (НРХ) РПА в критериальной форме будет иметь вид:

$$Eu = \frac{2}{aW + b} \cdot \left(\xi_{pc} + W^2 \right) \qquad (26)$$

где a и b – эмпирические постоянные, найденные из условия наилучшего согласования опытных и теоретических значений.

Найденные значения эмпирических коэффициентов a и b в диапазоне исследованных зазоров приведены в табл. 2. В первом приближении их значения можно принять постоянными для исследованных типов диспергирующих устройств РПА.

На рис. 13 показаны опытные кривые НРХ смесителя модификации «В» при межцилиндровом зазоре 0,4 мм, построенные в безразмерных координатах Eu – W.

Как видно из графика, полученные теоретические зависимости удовлетворительно описывают опытные данные; среднеквадратичная ошибка не превышает 15–20 %.

По результатам анализа теоретических и экспериментальных исследований предложены три новые конструкции многоцелевых РПА, которые позволяют интенсифицировать процессы гомогенизации, диспергирования, взбивания и абсорбции. Одна из них приведена на рис. 14.

Таблица 2

Постоянные напорно-расходной характеристики РПА модификации «В»

Межцилиндровый зазор, мм	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Временной коэффициент истечения $K\tau$	0,34	0,39	0,43	0,48	0,53	0,58
Коэффициент гидравлического сопротивления	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Коэффициент a 10^{+3}	0,08	0,15	0,32	0,48	0,26	0,45
Коэффициент b	6,3	5,6	4,9	4,6	5,1	4,8

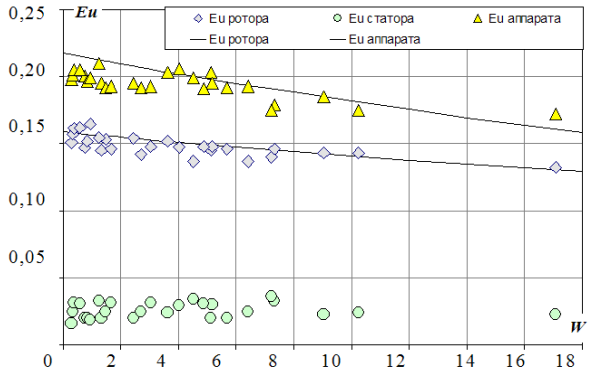


Рис. 13. Зависимость критерия Эйлера от параметра закрутки

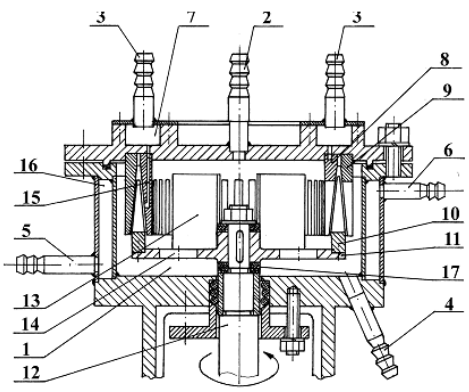


Рис. 14. Роторно-пульсационный аппарат с рециклом: 1 – рабочая полость; 2 – штуцер входа жидкого компонента; 3 – штуцер входа газового компонента; 4 – штуцер выхода готовой смеси; 5, 6 – штуцер входа и выхода хладоносителя; 7 – газовая камера; 8, 9 – венцы статора; 10 – венец ротора; 11 – ступица ротора; 12 – вал; 13 – лопасти; 14 – отверстия в ступице ротора; 15 – каналы в зубьях статора; 16 – рубашка; 17 – регулировочные шайбы

Результаты работы и выводы

1. Исследована возможность совмещения в одном аппарате процессов смешивания и диспергирования. Установлено, что центробежные смесители с конусным ротором при оптимально рассчитанных геометрических и режимных параметрах обладают хорошей диспергирующей способностью.

2. Проведены экспериментальные исследования влияния режимных и геометрических параметров работы смесителей с направленной организацией движения материалопотоков на интенсивность и эффективность процесса смешивания. Получены математические модели в виде уравнений регрессии, позволяющие найти рациональные конструктивные и технологические параметры аппаратов. Установлено, что интенсификации процесса способствует повышение накопительной и сглаживающей способностей аппаратов путем организации направленного движения прямых, рециркулирующих и пылевоздушных материалопотоков во внутреннем объеме аппарата за счет введения в его конструкцию дополнительных устройств.

3. Разработана гидродинамическая модель РПА, описывающая вихревые течения вязкой жидкости в его рабочих зонах при ламинарном и турбулентном режимах. Рассчитаны профили окружной скорости в межцилиндровых зазорах, роторе, статоре, дана оценка влияния радиального вдува на структуру вихревых течений РПА. Проведена проверка гидродинамической модели на адекватность, определены значения эмпирических постоянных, входящих в расчетные зависимости. Определены границы переходного режима вихревого потока в зазоре и значения коэффициентов эквивалентной шероховатости и гидравлического сопротивления роторного и статорного цилиндров.

4. Аналитическим путем получены зависимости для определения коэффициента мощности ступени РПА при ламинарном и турбулентном режимах и обобщенная энергетическая характеристика РПА. Расчетом установлено и экспериментально подтверждено наличие скачка мощности в переходной области.

5. Разработано количественное описание процесса преобразования механической энергии в РПА при прохождении потоком роторного и статорного цилиндров. Предложено обобщенное критериальное уравнение напорно-расходной характеристики РПА проходного типа, учитывающее влияние проскальзывания жидкости в роторе и гидравлические потери при обтекании прорезей статорного цилиндра.

6. Предложены три новые конструкции многоцелевых РПА (патенты № 2309791, 2257257, 22203728), где интенсификация процессов гомогенизации, диспергирования, взбивания, абсорбции при получении жидких комбинированных продуктов достигается за счет подвода газовой фазы в активную зону, организации регулируемого внутреннего рецикла и работы в резонансном режиме.

7. Результаты исследований и новые конструкции смесителей использованы при приготовлении смесей сухих и увлажненных комбинированных продуктов в технологических схемах получения регенерированного молока на сухой молочной основе, «сухого мороженого», пшеничного зерна с дисперсными добавками в технологии производства сухих завтраков (хлебцев), мучных смесей для приготовления блинов и сдобного печенья, сухих посолочных композиций для мясных полуфабрикатов, смесей сухих специй в производстве рыбных продуктов. Ожидаемый экономический эффект от промышленного внедрения смесителя для получения сухих посолочных композиций составил в ценах 2008 года 114 340 руб./год. Конструкторская техдокументация передана заказчикам для внедрения. Техническая новизна новых конструкций центробежных смесителей защищена 16 патентами РФ на изобретение.

Список литературы

1. Бакин, И.А. Теоретические и практические аспекты разработки конструкций центробежных смесителей для переработки дисперсных материалов: монография / И.А. Бакин, В.Н. Иванец. – Кемерово: КемТИППП, 2007. – 156 с.

2. Иванец, Г.Е. Разработка циркуляционного смесителя центробежного типа для получения сухих и увлажненных композиций / Г.Е. Иванец, С.А. Ратников, И.А. Бакин, В.П. Зверев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – № 6. – С. 60–61.

3. Иванец, В.Н. Разработка новых конструкций центробежных смесителей непрерывного действия для переработки дисперсных материалов / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Д.М. Бородулин // Известия вузов. Пищевая технология. – 2003. – № 4. – С. 94–98.

4. Иванец, В.Н. Интенсификация процесса смешивания за счет направленного формирования материальных и воздушных потоков / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, А.С. Волков // Химическая промышленность сегодня. – 2005. – № 11. – С. 52–56.

5. Иванец, В.Н. Определение диспергирующей способности центробежного смесителя / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, М.М. Винниченко, С.Г. Чечко, В.И. Маньянов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2006. – № 7. – С. 68–70.

6. Бакин, И.А. Смешивание компонентов регенерированного молока / И.А. Бакин // Молочная промышленность. – 2006. – № 12. – С. 58–60.

7. Бакин, И.А. Совмещение процессов смешивания и диспергирования в конусном центробежном аппарате / И.А. Бакин, С.Г. Чечко, А.В. Сибиль // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – № 3. – С. 60–63.

8. Иванец, Г.Е. Энергетическая характеристика РПА / Г.Е. Иванец, В.А. Плотников, П.В. Плотников // ЖПХ. – 2000. – Т. 73. – Вып. 9. – С. 1511–1514.

9. Плотников, П.В. Гидродинамика межцилиндрового потока РПА / П.В. Плотников, Г.Е. Иванец, С.Н. Альбрехт // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2000. – № 1. – С. 50–53.

10. Альбрехт, С.Н. Применение РПА при производстве молочных комбинированных продуктов / С.Н. Альбрехт, Г.Е. Иванец, П.В. Плотников // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2000. – № 2. – С. 42–43.

11. Иванец, Г.Е. Роторно-пульсационный аппарат для интенсификации стадии перемешивания при производстве комбинированных продуктов / Г.Е. Иванец, С.Н. Альбрехт, П.В. Плотников // Известия вузов. Пищевая технология. – 2000. – № 2–3. – С. 59–61.

12. Иванец, В.Н. Повышение эффективности газожидкостных процессов в роторно-пульсационном аппарате / В.Н. Иванец, С.Н. Альбрехт, Г.Е. Иванец // Химическая промышленность. – 2000. – № 11. – С. 46–48.

13. Иванец, В.Н. Исследование влияния перемешивающих устройств на интенсификацию газожидкостных процессов / В.Н. Иванец, С.Н. Альбрехт, Г.Е. Иванец // Журнал прикладной химии. – 2001. – Т. 74. – Вып. 3. – С. 451–455.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

V.N. Ivanets, I.A. Bakin, G.E. Ivanets

INTENSIFICATION OF HOMOGENIZATION AND DISPERSION PROCESSES WHEN OBTAINING DRY, MOISTENED AND LIQUID COMPOSITE FOODSTUFFS

The article summarizes the results of the development of new centrifugal mixers and mixing technology when obtaining dry and moistened composite foodstuffs. The article presents the analytical examination of flow hydrodynamics which allowed to get dependences of rotor-pulsating power factor at the laminar and turbulent modes and their generalized energy characteristics.

Homogenization, dispersion, mixing, intensification, device, composite mix.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru