УДК 621.929.2/.929.9

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ АППАРАТАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СМЕСЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

### Бородулин Д.М., Иванец В.Н., Сухоруков Д.В.

ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», Кемерово, e-mail: Pioner dias@mail.ru

Настоящая статья посвящена исследованию механического смешивания высокодисперсных компонентов в поле центробежных сил, разработке эффективного смесительного оборудования для получения наноматериалов, находящихся в разреженном состоянии. В результате проведенных экспериментальных исследований были изучены различные конструктивные и технологические характеристики центробежных смесителей непрерывного действия. Теоретически и экспериментально изучено влияние различных параметров аппарата на качество получаемой высокодисперсной смеси, получены регрессионные уравнения, описывающие процесс смешивания. Определение величин составляющих скорости материальных потоков и их направления внутри рабочей камеры смесителя центробежного типа при различных частотах вращения и конструктивных модификациях ротора позволило разработать новую конструкцию центробежного смесителя. Благодаря проведенным экспериментальным исследованиям была получена общая картина движения пылевоздушных потоков внутри рабочей камеры центробежного смесителя, позволяющая организовать направленное движение высокодисперсных компонентов и устранить эффект сегрегации при получении высокодисперсных компонентов и устранить эффект сегрегации при получении высокодисперсных компонентов в нанотехнологиях.

Ключевые слова: смешивание, наноматериалы, экспериментальные исследования, регрессионные уравнения, центробежный смеситель

# INTENSIFICATION OF MIXING PROCESS IN CENTRIFUGAL MIXERS OF CONTINUOUS ACTION FOR MIXTURES USED IN NANOTECHNOLOGIES

### Borodulin D.M., Ivanets V.N., Sukhorukov D.V.

Federal State-owned Budgetary Educational Institution of Higher Vocational Education Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Kemerovo, e-mail: Pioner dias@mail.ru

The present article is devoted to the study of mechanical mixing of highly disperse components in the field of centrifugal forces, the development of efficient mixing equipment for obtaining nanomaterials in a sparse state. As a result of the carried out experimental studies, various design and technological characteristics of centrifugal mixers of continuous action were studied. We studied the influence of various machine parameters on the quality of the resulting highly disperse mixture and obtained regression equations describing the mixing process. Determination of the direction and magnitude of the velocity components of the dust-air flows at different points in the working chamber of the centrifugal mixer at various rotational speeds and design modifications of the rotor made it possible to develop a new design for a centrifugal mixer. We have obtained a general picture of the motion of dust-air flows inside a centrifugal mixer, which makes it possible to organize the directed motion of highly dispersed components and eliminate the segregation effect in obtaining highly disperse powder materials used in nanotechnology.

Keywords: mixing, nanomaterials, experimental studies, regression equations, centrifugal mixer

Сегодня применение наноматериалов ограничено вследствие их недостаточной изученности, поэтому ученые все больше и больше времени уделяют подробному исследованию этих материалов, получая новые знания и аккумулируя их с другими для дальнейшего практического использования.

Одним из способов, позволяющих получать наноматериалы, является механическое смешивание высокодисперсных компонентов в поле центробежных сил, поэтому разработка эффективного смесительного оборудования является важной задачей при получении данных наноматериалов, находящихся в разреженном состоянии.

Основные требования, предъявляемые к смесителям непрерывного действия (СНД), такие как обеспечение качественного смешивания, высокая сглаживающая

способность, большая производительность, малые металло- и энергозатраты и др., удовлетворяются в центробежных смесителях. Ряд таких аппаратов, разработанных нами в лаборатории Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета), отвечают всем перечисленным выше требованиям благодаря организации внутри рабочей камеры смесителя направленной структуры движения материальных потоков.

Отличительной особенностью разработанных центробежных СНД является наличие ротора, выполненного в виде полого усеченного конуса, а также специальных конструктивных решений для создания рециклов или опережающих потоков. Рассмотрим ряд перспективных конструкций смесителей для получения наносмесей.

Интенсификация процесса смешивания в рабочей камере первого представителя класса центробежных СНД [1], разработанных нами, происходит за счет нескольких конструктивных особенностей. Во-первых, за счет установки углообразных турбулизаторов на внутренней поверхности конуса, расположенных под разными углами к его оси вращения. Вовторых, за счет установки рассеивающего диска на поверхности конуса. В-третьих, внутри корпуса смесителя расположены перфорированные направляющие. Потоки сыпучих компонентов пересекаются внутри аппарата вследствие различных углов наклона и длин углообразных направляющих. За счет этого увеличивается время пребывания частиц внутри аппарата и повышается его сглаживающая способность.

Помимо этого интенсификация процесса смешивания также может достигаться за счет установки гибкого шнека с внешней стороны смесителя [2], обеспечивающего внешнюю рециркуляцию потока материала обратно в рабочую зону, где он смешивается с исходными компонентами, поступившими в аппарат, повышая при этом качество получаемой смеси.

На представленных смесителях были проведены исследования по определению качества получения высокодисперсных наноматериалов. Результаты обработки полученных данных проведены в системе комплексного статистического анализа «Statistica». При исследовании процесса смешивания в центробежном аппарате непрерывного действия с углообразными лопастями в качестве зависимого фактора определяли коэффициент неоднородности Vc. В качестве независимых переменных были взяты: количество углообразных

В табл. 1 представлены показатели качества подобранной модели регрессии. R — коэффициент множественной корреляции. R2 — коэффициент детерминации — чрезвычайно важная характеристика, показывающая долю общего разброса (относительно средне зависимой переменной), которая объясняется построенной регрессией [5].

Таблица 1 Краткие сведения регрессионного анализа

	Значения анализа для высокоди- сперсной смеси		
Множественный R	0,94547		
Множественный R <sup>2</sup>	0,89391		
Скорректированный R <sup>2</sup>	0,88396		
F-критерий	89,87548		
р-значение	0,00000		
Стандартная ошибка оценки	1,55626		

Величина коэффициента R2 для высокодисперсной смеси равна 0,89391. Это свидетельствует о том, что с помощью данной регрессии возможно объяснить более 89% разброса значений переменной относительно средней величины. Величина F-критерия и уровня значимости p необходима для проверки гипотезы о значимости регрессии [3, 4]. Из табл. 1 видно, что построенная регрессия высоко значима, так как уровень значимости для исследуемых смесей равен нулю (F = 89.9, а p = 0.00) [6].

Для изучения степени вклада независимых переменных (C, n или h) в предсказание коэффициента неоднородности, нами были изучены регрессионные (или B) [6] коэффициенты [7]. Результаты представлены в табл. 2.

 Таблица 2

 Результаты множественной регрессии для высокодисперсной смеси

	Beta	Std. Err.	В	Std. Err.	t(23)	p-level
Свободный член			10,6	3,015	3,53	0,001284
X1 – переменная С	0,51	0,057	0,113	0,012	8,91	0,000000
X2 – переменная п	-0,041	0,057	-0,002	0,003	-0,71	0,478294
X3 – переменная h	-0,793	0,057	-0.79	0,057	-13,77	0,000000

турбулизаторов  $h(4 \div 12 \text{ шт.})$ , скорость ротора  $n(750 \div 950 \text{ мин}^{-1})$  и соотношение ингредиентов  $C(1:75 \div 1:125)$ .

Чтобы оценить степень зависимости независимых функциональных переменных –  $X_1$  (C),  $X_2$  (n),  $X_3$  (n) и отклика Vc, воспользовались методом множественной регрессии [3, 4].

Величина Beta коэффициентов показывает соответственные вклады [8] каждой из независимой переменной B предположение зависимой переменной B предположение оставнить их между собой. Из табл. 2 можно сделать вывод о статической значимости переменных C и B (их значения в таблицах представлены курсивом), поскольку их

значения стремятся к единице. Именно они оказывают наиболее значимое влиние (особенно h, у которого Beta = 0.8 - 0.9) на коэффициент неоднородности. Следует отметить отрицательное значение регрессионного коэффициента h для продукта; следовательно, с увеличением количества углообразных турбулизаторов снижается величина Vc. Вклад в регрессию для С имеет положительное значение, поэтому с уменьшением соотношения смешиваемых компонентов также снижается величина коэффициента неоднородности Vc. Незначительно влияет на качество процесса смешивания, по крайней мере в исследуемом диапазоне, частота вращения ротора. В связи с этим исключили данную величину X2 из регрессионного анализа.

Затем определили уравнения регрессии, которые описывают влияние режимных и технологических параметров исследуемого смесителя на качество смеси, в кодированном и натуральном видах соответственно [3].

$$Y = 24,4135 + 0,1904 \times X1 - 1,4975 \times X3 + 0,0014 \times X21 - 0,001 \times X1 \times X3 + 0,0552 \times X23,(1)$$

$$Vc = 25,13753 + 1,61248 \times h - 0,01497 \times C + 0,0896 \times h^2 - 0,00008 \times h \times C + 0,000006 \times C^2$$
. (2)

Рассмотрим отклик, описываемый уравнениями (1, 2), за исключением малозначимого коэффициента X2 [6], представленный на рис. 1.

Проанализировав представленную выше графическую зависимость, можно

сделать вывод о том, что количество углообразных турбулизаторов h=12, в рабочем органе усовершенствованного центробежного СНД (рис. 1), наиболее сильно влияет на качество смеси (коэффициент неоднородности Vc) [3].

При соотношении смешиваемых высокодисперсных компонентов 1:75 достигается минимально допустимое значение Vc. Однако и при соотношении 1:100 готовый продукт можно считать удовлетворительного качества, так как Vc не превышает 10% [4].

Однако, результаты проведенных исследований показали общие недостатки рассмотренных центробежных смесителей, а именно то, что при увеличении центробежной силы высокодисперсные компоненты в смеси поднимаются вверх, в результате этого происходит ее частичное расслоение (сегрегация).

Для устранения сегрегации и управления этими наночастицами необходимо знать их кинетику движения внутри рабочей камеры центробежного аппарата [7]. С этой целью нами были проведены исследования по определению направления и скорости наночастиц материала в смесителе, ротор которого вращался при частотах вращения  $(n=10\ c^{-1}, n=24\ c^{-1}-$  граничные минимальная и максимальная частоты вращения). Для того, чтобы наиболее полно представить картину распределения наночастиц внутри аппарата, нами были определены три составляющие пылевоздушного потока: осевая, радиальная и окружная [5].

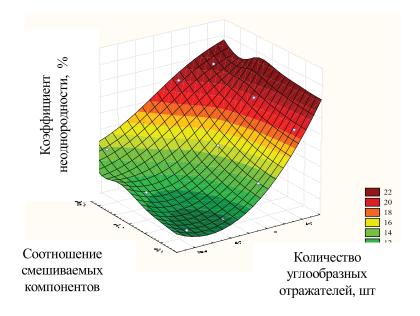


Рис. 1. Поверхность отклика для высокодисперсной смеси

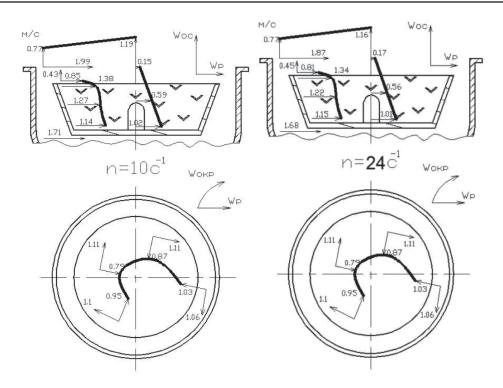


Рис. 2. Эпюры скоростей внутри центробежного смесителя с углообразными турбулизаторами

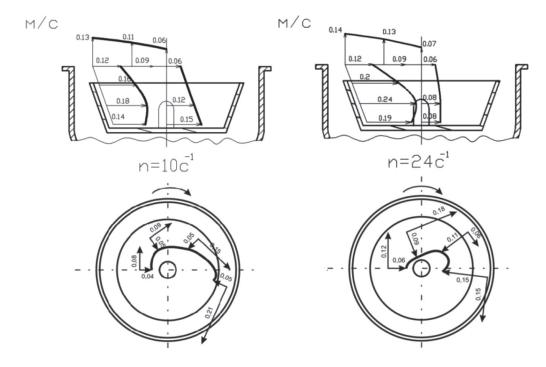


Рис. 3. Эпюры скоростей внутри центробежного смесителя с гибким шнеком

Полученные результаты в виде эпюр распределения средних величин составляющих скорости наночастиц внутри рабочего объема центробежного смесителя представлены на рис. 2, 3.

Из полученных величин составляющих скоростей пылевоздушных потоков можно сделать следующие выводы [4].

Наибольшее значение осевой составляющей скорости Woc достигается на рабочем

органе СНД с углообразными турбулизаторами при частоте вращения ротора 10 с<sup>-1</sup>. Ее величина на 20% больше, чем на роторе с гибким шнеком. Максимальное значение *Woc* достижимо при следующих параметрах: частоте вращения ротора 24 с<sup>-1</sup>, использовании углообразных турбулизаторов. Величины составляющей скорости на данной модификации больше на 12% [3], по отношению к величинам осевой составляющей скорости *Woc*, замеренной на роторе смесителя с гибким шнеком.

В результате проведенных исследований выяснили, что величины составляющих скорости пылевоздушных и материальных потоков на рабочем органе первого исследуемого смесителя больше на 3% (при частоте вращения ротора равной 10 с<sup>-1</sup>), чем *Wp* второго исследуемого смесителя. Максимальное значение величин составляющих скорости, при частоте вращения ротора 24 с<sup>-1</sup>, достигается [4] на рабочем органе СНД с углообразными турбулизаторами. Величины при этом больше на 20% по отношению к величинам составляющих скоростей материальных потоков в радиальном направлении на роторе СНД с гибким шнеком.

При окружной составляющей скорости, находящейся в диапазоне 0,1..0,15 м/с, наблюдается, что высокодисперсные компоненты частично вовлекаются в воздушное пространство рабочей камеры центробежного смесителя. Дальнейшее увеличение *Wокр* до 0,28 м/с приводит к образованию вихревых движений [3] высокодисперсных пылевоздушных потоков, что приводит к возникновению явления сегрегации получаемой смеси из наночастиц.

Для устранения сегрегации и увеличения эффективности процесса смешивания наночастиц предлагается установить в верхней части рабочей камеры смесителя конусообразный диффузор. Данное техническое решение позволило организовать направленное движение пылевоздушных потоков в центр ротора, увеличив вихревое движение приблизительно на 40% [3]. Помимо этого, в результате установки диффузора, потоки воздуха пересекаются с потоками наноматериала, находящимися в верхней части рабочей камеры смесителя непосредственно над конусом [3] ротора.

Работа смесителя центробежного типа с направляющим диффузором [9] происходит следующим образом. Сыпучие компоненты подаются на поверхность вращающегося диска ротора через загрузочный патрубок, а затем под действием центробежной силы равномерно движутся по этой поверхности. Далее частицы поднимаются

по поверхности полого тонкостенного усеченного конуса. Помимо этого, с момента движения компонентов по конусу, высокодисперсные частицы движутся вверх в пылевоздушное пространство, а основной поток материала продолжает движение по его поверхности. Высокодисперсные частицы, поднявшись, огибают поверхность направляющего диффузора и стремятся к центру ротора, смешиваясь с новым потоком материала, движущимся по вращающейся поверхности конуса. Достигнув [3] верхней кромки конуса, под действием центробежной силы, полученная смесь падает в пространстве между ротором и корпусом на днище смесителя. Через разгрузочный патрубок смесь выгружается из [10] аппарата разгрузочными лопастями.

В результате проведенных экспериментальных исследований были изучены различные конструктивные и технологические характеристики центробежных смесителей непрерывного действия. Теоретически и экспериментально изучено влияние различных параметров аппарата на качество получаемой высокодисперсной смеси, получены регрессионные уравнения [11-13], описывающие процесс смешивания. Определение направления и величины составляющих скорости пылевоздушных потоков в различных точках рабочей камеры [14] центробежного смесителя при различных [8] величинах частоты вращения и конструктивных модификациях ротора позволило разработать новую конструкцию центробежного смесителя. Благодаря проведенным экспериментальным исследованиям была получена общая картина движения материальных потоков внутри рабочей камеры центробежного смесителя, позволяющая [3] организовать направленное движение высокодисперсных компонентов и устранить эффект сегрегации при получении высокодисперсных порошкообразных материалов, используемых в нанотехнологиях.

#### Список литературы

- 1. Пат. 2496561 РФ, МПК В01 F7/26. Центробежный смеситель / Д.М. Бородулин, А.А. Андрюшков, Л.А. Войтикова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» (Ru). № 2012125453/05; заявл 19.06.12; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
- 2. Пат. 2523576 РФ. Центробежный смеситель / Иванец В.Н., Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. № 2013105870/05; заявл. 12.02.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
- 3. Бородулин Д.М. Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: дис. ... док. техн. наук. Кемерово, 2013. 178 с.

- 4. Иванец В.Н. Исследование направления и скорости воздушных потоков в рабочей камере центробежного смесителя / В.Н. Иванец, Д.М. Бородулин, Д.В. Сухоруков // Техника и технология пищевых производств. -2013. -№ 1. -C. 71–74.
- 5. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия Телеком, 2013. 288 с.
- 6. Сухоруков Д.В. Разработка и исследование центробежного смесителя непрерывного действия с организацией направленного движения материальных потоков: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2014. – 151 с.
- 7. Бакин И.А. Интенсификация процессов смешивания при получении комбинированных продуктов в аппаратах центробежного типа: дис. ... док. техн. наук. Кемерово, 2009 320 с
- 8. Андрюшков А.А. Разработка и исследование новых конструкций смесителей непрерывного действия центробежного типа для получения комбинированных продуктов: дис. канд. техн. наук. Кемерово, 2013. 232 с.
- 9. Пат. 2545298 РФ, Центробежный смеситель с направляющим диффузором / Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Ратников С.А.; заявитель и патентообладатель

- Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. № 2013105920/05; заявл. 21.08.2013; опубл 18.06.2015, Бюл. № 19.
- 10. Просин М.В. Разработка и исследование роторнопульсационного экстрактора для интенсификации процесса затирания при производстве пива: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2014. 150 с.
- 11. Елисеева И.И. Статистика. Учебник для вузов / И.И. Елисеева. П.: Питер, 2010. 360 с.
- 12. Сергеева И.Ю. Моделирование процесса осветления напитков брожения с помощью вспомогательных средств / И.Ю. Сергеева, А.В. Шафрай, Д.Г. Захаренко // Техника и технология пищевых производств. -2013. -№ 3. -C. 58–61.
- 13. Статистика: учебник для вузов / Под ред. И.И. Елисеевой. СПб.: Питер, 2010. 368 с.: ил. (Серия «Учебник для вузов»).
- 14. Остроух А.В. Имитационное моделирование неоднородности строительной смеси в горизонтальном барабанном смесителе / А.В. Остроух, Вэй Пью Аунг, Мьо Лии Аунг, Н.Е. Суркова // В мире научных открытий. -2014. -№ 12. -C. 766–779.