



УДК 621.929.2/9

**Д.М. Бородулин, А.И. Саблинский**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СМЕСИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА,  
РАБОТАЮЩЕГО ПО МЕТОДУ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАЗБАВЛЕНИЯ СМЕСИ**

*В статье описано влияние метода последовательного разбавления смеси с заданным соотношением компонентов на качество получаемого продукта в смесительном агрегате, включающего в свой состав смеситель непрерывного действия центробежного типа. Приведены выводы и рекомендации по определению рациональных параметров работы смесительного агрегата.*

**Ключевые слова:** смеситель непрерывного действия, метод разбавления смеси, центробежный тип, агрегат, параметр.

**D.M. Borodulin, A.I. Sablinskiy**

**THE RESEARCH OF CENTRIFUGAL MIXING UNIT FUNCTIONING THAT IS WORKING ACCORDING  
TO THE METHOD OF THE MIX CONSECUTIVE DILUTION**

*The influence of the mix consecutive dilution method with the given ratio of components on the received product quality in the mixing aggregate, including the centrifugal type mixer of the continuous action in its composition is described in the article. The conclusions and recommendations about determination of the mixing unit operation rational parameters are given.*

**Key words:** continuous action mixer, mix dilution method, centrifugal type, unit, parameter.

---

**Введение.** При получении смесей заданного качества с соотношением компонентов порядка 1:500–1000 с целью экономии времени и затрат энергии необходимо использовать центробежные смесители, работающие по методу последовательного разбавления смеси [1]. Его суть заключается в том, что основной компонент смеси (содержание которого в композиции максимально) разделяют на две и более части. Далее смешивают одну его часть с остальными компонентами. В полученную смесь добавляют еще одну часть основного компонента и вновь смешивают. Таким образом, процесс получения готовой композиции разбивают на два и более этапа, т.е. смесь, получаемая на первом этапе, постепенно разбавляется основным компонентом на последующих стадиях приготовления композиции нужного состава.

Поэтому разработка эффективных непрерывно действующих смесительных агрегатов (СА) центробежного типа для получения смесей с заданным соотношением компонентов методом последовательного разбавления является актуальной научной задачей, представляющей практический интерес для сельскохозяйственных, пищевых, химических и строительных отраслей [2].

**Цель исследований.** Создание центробежных непрерывно действующих смесительных агрегатов, обеспечивающих повышение их эффективности за счёт использования результатов регрессионного анализа и экспериментальных исследований влияния различных факторов на процесс смешивания.

**Задачи исследований:** теоретическое обоснование конструкций СНД центробежного типа нового поколения (входящие в состав СА) для получения качественных смесей при соотношении смешиваемых компонентов до 1:1000; на основе экспериментальных и регрессионных данных определить рациональные конструктивные и технологические параметры работы центробежных смесителей, обеспечивающих стабильность качества готовой продукции; оценка эффективности работы смесителя на основе исследований его удельных энергозатрат и сравнения полученных данных с другими аппаратами.

**Методы и результаты исследований.** На рисунке 1 приведена схема центробежного смесительного агрегата, включающая в свой состав блок дозаторов и новую конструкцию центробежного смесителя непрерывного действия (СНД) [6], работающего по методу последовательного разбавления смеси. С целью про-

верки его работоспособности и сравнения результатов, полученных ранее на двух последовательно установленных СНД [1,4], были проведены идентичные эксперименты по определению качества смеси.



Рис. 1. Схема смесительного агрегата:  
1, 2 и 3 – дозаторы; 4 – оригинальная конструкция центробежного СНД;  
5 – ленточный пробоотборник; 6 – пульт управления

В ходе экспериментов варьировалось соотношение смешиваемых компонентов  $1:600 \div 1:1000$  (концентрация ключевого компонента в смеси  $0,1666 \div 0,1\%$ ), частота вращения ротора СНД  $10 \div 15 \text{ с}^{-1}$ .

С целью анализа получаемых смесей отбирались 30 проб массой по 50 г для определения распределения соли, сахара и аскорбиновой кислоты и массы компонентов смеси относительно теоретического значения. Концентрации ключевого компонента в смеси определяли химическим способом с помощью поляриметрического, ионометрического [3] и фотометрического [7] методов. Качество смешивания оценивалось при помощи коэффициента неоднородности  $V_c$ . Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Значения коэффициента неоднородности, полученные на оригинальной конструкции СНД

Фактор и его значение		Коэффициент неоднородности $V_c$ , % для смесей			
$C$ , %	$n$ , $\text{с}^{-1}$	Сухое молоко – аскорбиновая кислота	Мука пшеничная – аскорбиновая кислота	Сахар – манка	Пшено-поваренная соль
0,1666	10	8,90	8,62	8,24	6,69
0,1333	10	9,41	8,79	8,46	6,97
0,1	10	12,82	11,84	10,47	9,93
0,1666	12,5	7,15	7,36	7,84	7,22
0,1333	12,5	7,45	8,26	8,39	7,33
0,1	12,5	11,64	11,49	9,56	7,48
0,1666	15	7,38	7,54	7,45	6,35
0,1333	15	8,85	8,31	8,95	8,25
0,1	15	11,61	11,43	9,06	7,62

Анализ табл. 1 показывает, что качество полученных смесей изменялось от хорошего ( $V_c = 6,69 \div 9\%$ ) до удовлетворительного ( $V_c = 9 \div 12\%$ ). Смеси удовлетворительного качества получались при концентрации ключевого компонента, равной 0,1 %, и частотах вращения ротора 10 и 15 с<sup>-1</sup>. С повышением концентрации коэффициент неоднородности уменьшался. При смешивании хорошо сыпучих и близких по составу компонентов получали смеси хорошего качества при  $n = 12,5$  с<sup>-1</sup> во всем диапазоне концентраций.

Далее проведем сравнительную оценку влияния исследуемых параметров на коэффициент неоднородности для каждой смеси, которая представлена в табл. 2. В ней последовательно представлены *Mean* – средние значения коэффициентов неоднородности, *t* – критерий и уровень значимости *p*.

Таблица 2  
Значения показателей регрессионного анализа

Состав смеси	<i>Mean</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
C	0,13		
СМ-АК	9,46	-13,2	0,0000
МП-АК	9,29	-15,2	0,0000
С-М	8,71	-27,3	0,0000
П-ПК	7,53	-20,7	0,0000
<i>n</i>	12,5	-	-
СМ-АК	9,46	2,72	0,0259
МП-АК	9,29	3,18	0,0128
С-М	8,71	4,42	0,0022
П-ПК	7,53	5,77	0,0004

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что наибольшее влияние на коэффициент неоднородности оказывает соотношение смешиваемых компонентов, так как уровни значимости *t*-критериев для всех смесей равны нулю, по отношению к модельному равному 0,05 (то есть для 95 % уровня доверия). Частота вращения ротора в меньшей степени оказывает влияние на качество всех смесей, так как её уровни значимости равны 0,02595 (СМ-АК); 0,01281 (МП-АК); 0,00221 (С-М); 0,000418 (П-ПК).

Регрессионные уравнения, описывающие влияние концентрации и частоты вращения ротора исследуемого СНД на качество приготавливаемых смесей в натуральном виде, приведены ниже.

Для смеси сухое молоко – аскорбиновая кислота:

$$V_c = 0,0277 \times n^2 - 15,6 \times c \times n + 1615678,57 \times c^2 + 30885,4 - 446308,4 \times c - 0,35 \times n. \quad (1)$$

Для смеси мука пшеничная – аскорбиновая кислота:

$$V_c = 0,0099 \times n^2 - 25,1 \times c \times n + 1490396,3 \times c^2 + 28383,3 - 411172,5 \times c + 2,5 \times n. \quad (2)$$

Для смеси сахар – манка:

$$V_c = 0,0045 \times n^2 + 12,3 \times c \times n + 347944,3 \times c^2 + 6814,7 - 97225,4 \times c - 2,1 \times n. \quad (3)$$

Для смеси пшено-поваренная соль:

$$V_c = 0,0075 \times n^2 + 53,6 \times c \times n + 200442,9 \times c^2 + 4246,9 - 58281,6 \times c - 8,07 \times n. \quad (4)$$

Для сравнения качества различных смесей, полученных на исследуемом СНД, и двух последовательно соединенных смесителях [4,5], представим коэффициенты неоднородности, полученные ранее [1], в табл. 3.

Таблица 3

Качество смесей, полученных на различных СА при соотношении смешиаемых компонентов 1:1000

Состав смеси	СА с СНД новой конструкции	СА с двумя последовательно соединенными СНД
Коэффициент неоднородности смеси $V_c$ при $n = 10 \text{ с}^{-1}$		
СМ – АК	12,82	14,3
МП – АК	11,84	13,21
С – М	10,47	11,54
П – ПС	9,93	10,98
Коэффициент неоднородности смеси $V_c$ при $n = 12,5 \text{ с}^{-1}$		
СМ – АК	11,64	12,98
МП – АК	11,49	12,81
С – М	9,56	10,57
П – ПС	7,48	8,21
Коэффициент неоднородности смеси $V_c$ при $n = 15 \text{ с}^{-1}$		
СМ – АК	11,61	12,95
МП – АК	11,43	12,75
С – М	9,06	10,02
П – ПС	7,62	8,42

Приведенные результаты показывают, что использование центробежного смесителя новой конструкции позволяет улучшить качество смесей на 8–10 %. Поэтому для получения смесей при соотношении компонентов 1:1000 целесообразно использовать СНД новой конструкции.

Эффективность работы последнего [6] оценивалась также с точки зрения его удельных энергетических затрат. Для этого при заданной частоте вращения ротора СНД проводилось измерение потребляемой мощности на холостом ходу  $N_x$ , Вт и под нагрузкой  $N_p$ , Вт. После этого определялись удельные энергозатраты  $\dot{\mathcal{E}}_y$  по формуле:

$$\dot{\mathcal{E}}_y = (N_p - N_x)/Q, \quad \text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}, \quad (5)$$

где  $Q$  – производительность смесителя, кг/ч.

Полученные данные в виде графических зависимостей представлены на рис. 2.

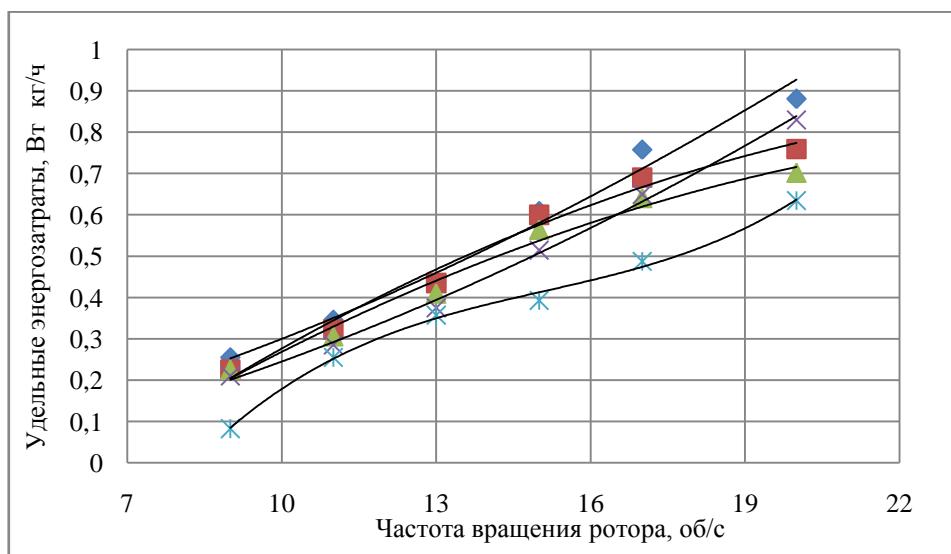


Рис. 2. Зависимость удельных энергетических затрат от частоты вращения ротора

Как видно из рис. 2, значения Эу, полученные на каждой из исследуемых частот вращения ротора для различных материалов, находятся практически рядом друг с другом и возрастают по мере её увеличения. Следовательно, удельные энергозатраты зависят от частоты вращения ротора и на них практически не влияют физико-механические характеристики смешируемых компонентов.

Для оценки эффективности использования нового СНД сравним его основные характеристики с двумя последовательно соединенными СНД, представленными в табл. 4.

Таблица 4  
Основные характеристики СНД центробежного типа

Тип смесителя	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Удельная материалоемкость, т·ч/м <sup>3</sup>	Удельные энергозатраты, кВт·ч/м <sup>3</sup>
СНД новой конструкции [6]	0,64	0,039	0,89
Два последовательно соединенных СНД [4, 5]	0,64	0,051	1,27

Из таблицы 4 видно, что при равной производительности удельные энергозатраты в конструкции нового смесителя ниже на 30 %.

### Выводы

1. Определены рациональные технологические параметры работы нового центробежного СНД, а именно частота вращения рабочего органа – 12,5 об/с и концентрация ключевого компонента в смеси 0,166, уменьшение которой ведет к ухудшению качества смеси.

2. Анализ эффективности процесса смесеприготовления по методу последовательного разбавления смеси при соотношении исходных компонентов порядка 1:600–1000 показал, что новая оригинальная конструкция СНД по сравнению с двумя последовательно соединенными аппаратами позволяет улучшить качество получаемой смеси на 8 ÷ 10 % при снижении энергозатрат на 30 %.

### Литература

1. Бородулин Д.М., Иванец В.Н. Развитие смесительного оборудования центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: монография. – Кемерово, 2008. – 152 с.
2. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования экспериментов. – М.: Де Ли Принт, 2005. – 296 с.
3. Гельфман М.И., Кирсанова Н.В. Практикум по физической химии: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2004. – 256 с.
4. Пат. 2207186 Российская Федерация, МПК B01 F7/26. Центробежный смеситель / Иванец В.Н., Бакин И.А., Бородулин Д.М., Зверев В.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КемТИПП. – № 2001130371/12; заявл. 09.11.2001; опубл. 27.06.2003, Бюл. № 18. – 3 с.
5. Пат. 2361653 Российская Федерация, МПК B01 F7/26. Центробежный смеситель / Ратников С.А., Бородулин Д.М., Селюнин А.Н., Сибиль А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КемТИПП. – № 2008115038/15; заявл. 16.04.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 3 с.
6. Пат. 2207901 Российская Федерация, МПК 7 B01 F7/26. Центробежный смеситель / Иванец В.Н., Бакин И.А., Бородулин Д.М., Зверев В.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КемТИПП. – № 2001120866/12; заявл. 25.07.2001; опубл. 10.07.2003, Бюл. № 19. – 7 с.
7. Скурихин И.М., Тутельян В.А. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов. – М., 1998. – 340 с.

