

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ДВУХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО УСТАНОВЛЕННЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СНД, ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СМЕСИ
С СООТНОШЕНИЕМ СМЕШИВАЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ 1:1000 МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
РАЗБАВЛЕНИЯ**

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

Ключевые слова: сыпучий материал, смесь, агрегат, компонент, соотношение, эксперимент.

*D.M. Borodulin, A.I. Sablinskiy,
D.V. Sukhorukov, A.A. Andrushkov*

**THE RESEARCH OF WORK OF MIXING UNIT, COMPRISING TWO SEQUENTIALLY SET CENTRIFUGAL SNM,
FOR PRODUCING THE MIXTURE WITH MIXED COMPONENTS RATIO OF 1:1000 BY SERIAL DILUTION ME-
THOD**

The article describes the influence of the mixture sequential diluting method with the component given ratio on the quality of the received product in the mixing unit, which includes mixers of centrifugal type. The conclusions and recommendations on the definition of mixing unit work rational parameters are given.

Key words: loose material, mixture, aggregate, component, correlation, experiment.

Введение. Смешивание сыпучих материалов – процесс, используемый в производстве продуктов питания, химических удобрений, пластмасс, стекольных шихт, а также в строительной промышленности. Переработка некоторых сыпучих материалов известна в практике человеческой деятельности с незапамятных времен, но научные и инженерные основы этих технологий стали предметом исследования лишь в предыдущее столетие. Это связано с резким ростом объемов перерабатываемых материалов и разнообразия их видов, когда наработанный в течение столетий методом проб и ошибок опыт перестал удовлетворять запросам развивающихся производств.

При выборе конструкции смесителя и его параметров необходимо учитывать, что он, наряду с хорошим перемешиванием, должен обеспечивать сглаживание пульсаций подаваемых объемными дозаторами материалопотоков при малых энерго- и металлоемкостях. Не все дозаторы непрерывного действия могут обеспечить поступление постоянно одинакового количества компонента в определенный момент времени, так как многие из них производят подачу компонентов по синусоидальному закону с некоторым отклонением по массе компонента. Смесители непрерывного действия (СНД) центробежного типа хорошо сглаживают флуктуации этих дозаторов [1]. Однако широкого распространения в промышленности эти аппараты еще не получили. Это объясняется тем, что при получении многокомпонентных смесей не удастся обеспечить на заданном уровне функционирование блока дозирующих устройств, которые будут выдавать потоки материала в смеситель с минимальными флуктуациями в заданном соотношении компонентов, в особенности при использовании объемных дозаторов. Оснащение же блока автоматическими весовыми дозирующими устройствами часто бывает экономически неоправданным. От качества получаемых смесей, главным образом, от их однородности напрямую зависят потребительские свойства производимой продукции.

Цели и задачи исследований. В связи с этим центробежные СНД целесообразно использовать при производстве различных порошкообразных молочных смесей, смесей детского питания, комбикормов, строительных и шихтовых материалов. В ряде случаев возникает необходимость получения качественных смесей с соотношением компонентов порядка 1:500...1000, которые выгоднее получать методом последовательного разбавления. 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), включающих в свой состав СНД центробежного типа, для получения многокомпонентных смесей с заданным соотношением компонентов методом последовательного разбавления является актуальной научной задачей, представляющей практический интерес для сельскохозяйственных, пищевых, химических и строительных отраслей.

Методы и результаты исследования. Для достижения данной цели в КемТИППе в лаборатории смесительного и дозирочного оборудования разработан смесительный агрегат (рис.1). Он состоит из дозирочного оборудования (двух шнековых и порционного дозаторов), двух последовательно соединенных смесителей непрерывного действия центробежного типа.

Эксперименты проводились следующим образом. Основные компоненты подавались шнековым 1, а ключевой порционным 2 дозаторами в СНД 3 [5] (см. рис.1), при их соотношении 1:10. Далее полученная смесь и основной компонент из шнекового дозатора 4 поступали в СНД 5 [4]. В нем проходил второй этап смешивания, при котором предварительная смесь разбавлялась основным компонентом до содержания ключевого компонента в диапазоне от 1: 600 до 1:1000. То есть, на втором этапе соотношение предварительной смеси и основного компонента составляло от 1:60 до 1:100. Также в ходе экспериментов изменялась частота вращения роторов обоих центробежных смесителей (ЦС) от 10 до 15 с⁻¹.



Рис. 1. Схема смесительного агрегата центробежного типа

Для исследования работы предложенного СА использовались следующие основные компоненты: сухое молоко, мука пшеничная, сахар-песок, пшено. В качестве ключевых – аскорбиновая кислота, манка и поваренная соль.

По методике, изложенной в книге Ю.П. Грачева [2], были определены все необходимые параметры для определения ПФЭ 2 на двух конструкциях СНД.

Базовые (нулевые) точки и шаги варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования

Фактор и его обозначение	Верхний уровень	Нижний уровень	Центр плана	Интервал варьирования
Частота вращения ротора n , с ⁻¹	15	10	12,5	2,5
Соотношение смешиваемых компонентов C	1:600	1:1000	1:800	1:200

С целью получения более точного значения измеряемого параметра на каждом режиме работы СНД проводилась серия опытов (от 3 до 5), из которой исключались результаты, значительно отличающиеся от средних.

Усредненные значения коэффициента неоднородности представлены в таблице 2.

Коэффициент неоднородности, полученный на двух последовательно установленных ЦС

Названия факторов и их значения		Коэффициент неоднородности V_c для смесей, %			
С	n	Сухое молоко – аскорбиновая кислота	Мука пшеничная – аскорбиновая кислота	Сахар – манка	Пшено – поваренная соль
1:600	10	9,87	9,56	9,14	7,42
1:800	10	10,5	9,81	9,35	7,71
1:1000	10	14,3	13,21	11,54	10,98
1:600	12,5	7,98	8,21	8,67	7,98
1:800	12,5	8,31	9,21	9,28	8,1
1:1000	12,5	12,98	12,81	10,57	8,27
1:600	15	8,23	8,41	8,24	7,02
1:800	15	9,87	9,27	9,9	9,12
1:1000	15	12,95	12,75	10,02	8,42

Анализ данных таблицы 2 показывает, что качество полученных смесей можно считать удовлетворительным, так как коэффициент неоднородности находится в диапазоне 7–14 %. Большая величина V_c соответствует плохосыпучим смесям (сухое молоко – аскорбиновая кислота, мука пшеничная – аскорбиновая кислота) при соотношении смешиваемых компонентов 1:1000 и частоте вращения роторов 15 с⁻¹. При этом наблюдалось налипание смешиваемых материалов на стенки корпуса и ротора у обоих ЦС. Часть материала переходит в пылевоздушное пространство, витая в нем на протяжении всего периода процесса смешивания, происходит сегрегация смеси и ухудшение ее качества. Наилучшие результаты получались на хорошо сыпучих смесях, имеющих близкие физико-механические характеристики (по плотности и гранулометрическому составу). Например, смесь пшено – поваренная соль во всем диапазоне исследований имела коэффициент неоднородности не более 10%. Однако смешивание таких компонентов на больших частотах вращения ротора подвергает их частичному измельчению, приводящему к некоторой погрешности в измерениях качества смеси ситовым анализом, сопутствующей некоторому увеличению V_c .

При помощи пакета «Statistica 6.0» проводили вычисление корреляций между следующими переменными: соотношение смешиваемых компонентов С; частота вращения роторов n; V_c для смеси сухое молоко – аскорбиновая кислота (СМ-АК); V_c для смеси пшеничная мука – аскорбиновая кислота (ПМ-АК); V_c для смеси сахар – крупа манная (С-КМ); V_c для смеси пшено – поваренная соль (П-ПС). Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Корреляционная матрица

Показатель	С	n	V_c СМ – АК	V_c ПМ – АК	V_c С – КМ	V_c П – ПС
С	1,000	0,000	0,874262	0,912675	0,874776	0,653336
n	0,000	1,000	-0,2236	-0,1558	-0,2690	-0,1928
V_c СМ – АК	0,874	-0,223	1,000000	0,975923	0,907912	0,672345
V_c ПМ – АК	0,912	-0,155	0,975923	1,000000	0,882834	0,617055
V_c С – КМ	0,874	-0,269	0,907912	0,882834	1,000000	0,871270
V_c П – ПС	0,653	-0,192	0,672345	0,617055	0,871270	1,000000

На пересечении строк и столбцов стоят корреляции переменных. Можно заметить, что матрица симметричная, это отражает тот факт, что коэффициент корреляции, например, переменных V_c СМ–АК, конечно же, равен коэффициенту корреляции при V_c СМ – АК. Из данной таблицы видно, как на каждую из смесей влияют С и n. Например, для смеси ПМ – АК соотношение смешиваемых компонентов оказывает наибольшее влияние, так как коэффициент корреляции стремится к единице (0,912). Частота вращения роторов меньше влияет на качество смеси, так как их коэффициент корреляции находится около нуля (-0,155). Из

таблицы видно, что корреляция положительна, так как коэффициент вариации при различных частотах вращения и соотношении смешиваемых компонентов на различных смесях носит хаотичный порядок. Его величина не уменьшается, а даже в некоторых случаях увеличивается с возрастанием частоты вращения ротора и понижением соотношения смешиваемых компонентов.

Далее проведем сравнительную оценку взаимодействия C и n на усредненные значения V_c при смешивании различных смесей, которая представлена в виде графика «Box & Wisker» (рис. 2).

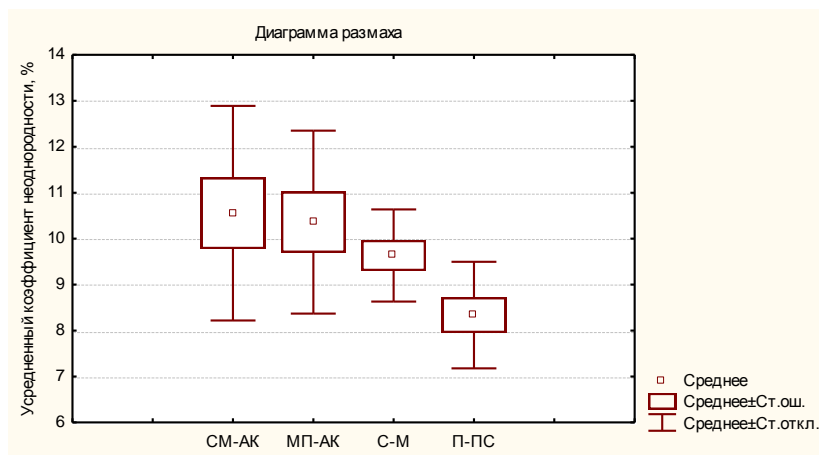


Рис. 2. Усредненные значения коэффициентов неоднородности для различных смесей

Из графика видно, что средняя величина V_c различна и склонна к возрастанию при смешивании плохо сыпучих компонентов и к уменьшению при получении хорошо сыпучих смесей, близких по физико-механическим свойствам.

Для оценки функциональной зависимости между независимыми функциональными переменными – $X_1(C)$, $X_2(n)$ и откликом V_c воспользовались методом множественного регрессионного анализа [3].

В таблице 4 приводятся показатели качества подобранной модели регрессии. Например, для смеси сухое молоко – аскорбиновая кислота R^2 равен 0,81436. Это значит, что построенная регрессия объясняет более 81 % разброса значений переменной относительно среднего. F -критерий = 13,16, p = 0,00640.

Таблица 4

Краткие сведения регрессионного анализа

Показатель	Значения анализа			
	Сухое молоко – аскорбиновая кислота	Мука пшеничная – аскорбиновая кислота	Сахар – манка	Пшено – поваренная соль
Множественный R	0,90242	0,92589	0,91522	0,681216
Множественный R^2	0,81436	0,85727	0,8376	0,464055
Скорректированный R^2	0,75248	0,80969	0,7835	0,285406
F-критерий	13,16030	18,01845	15,475	2,597586
p-значение	0,00640	0,00291	0,00428	0,153944
Стандартная ошибка оценки	1,16225	0,86860	0,46679	0,980464

Следовательно, построенная регрессия высокосignификантна, так как уровень значимости p для исследуемых смесей стремится к нулю. Стандартная ошибка оценки показывает рассеяние наблюдаемых значений относительно регрессионной прямой.

Для того чтобы узнать, какие из независимых переменных (C или n) дают больший вклад в предсказание коэффициента неоднородности, необходимо изучить регрессионные (или B) коэффициенты. Для этого представим в таблице 5 результаты множественной регрессии.

Результаты множественной регрессии

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(23)	p-level
<i>Смесь сухое молоко – аскорбиновая кислота</i>						
Свободный член	-	-	-226,97	48,45	-4,6841	0,003381
X1	0,8742	0,1758	2,358	0,474	4,9702	0,002526
X2	-0,2236	0,1758	-0,241	0,189	-1,2715	0,250597
<i>Смесь мука пшеничная – аскорбиновая кислота</i>						
Свободный член	-	-	-201,87	36,21	-5,5745	0,001414
X1	0,9126	0,1542	2,098	0,354	5,9174	0,001037
X2	-0,1558	0,1542	-0,143	0,141	-1,0105	0,351248
<i>Смесь сахар – манка</i>						
Свободный член	-	-	-92,16	19,46	-4,7358	0,003205
X1	0,8747	0,1645	1,0133	0,190	5,3175	0,001799
X2	-0,2690	0,1645	-0,1247	0,076	-1,6354	0,153063
<i>Смесь пшено – поваренная соль</i>						
Свободный член	-	-	-79,62	40,87	-1,9478	0,099360
X1	0,6533	0,2988	0,8750	0,400	2,1860	0,071467
X2	-0,1928	0,2988	-0,103	0,160	-0,6453	0,542549

В данной таблице представлены стандартизованные коэффициенты Beta и нестандартизованные B регрессионные коэффициенты (веса), их стандартные ошибки Std. Err. Beta и Std. Err. B и уровни значимости p-level, а также t – критерий для проверки гипотезы о равенстве 0 свободного члена регрессии. Beta-коэффициенты оцениваются по стандартизованным данным, имеющим выборочное среднее 0 и стандартное отклонение 1. Поэтому величина Beta коэффициентов позволяет нам сравнить соответственные вклады каждой из независимых переменных в предположение зависимой Vc. Как видно из таблицы результатов, статически значимой является переменная C (ее значения в таблице представлены курсивом), значения которой самые большие, т.е. стремятся к единице. Именно она оказывает наиболее сильное влияние на коэффициент неоднородности. Причем для всех смесей регрессионный коэффициент X1 положителен, т.е., чем меньше соотношение смешиваемых компонентов, тем меньше коэффициент неоднородности Vc. Вклад в регрессию коэффициента X2 отрицателен. Поэтому, чем больше частота вращения роторов, тем меньше Vc. Также можно отметить, что минимальные значения Beta-коэффициентов имеет регрессионный X2, который оказывает небольшое влияние на качество смешивания, по крайней мере, в исследуемом диапазоне.

Далее находим уравнения регрессии, описывающие влияние технологических и режимных параметров СНД на качество изготавливаемых смесей в кодированном и натуральном виде соответственно.

Для смеси сухое молоко – аскорбиновая кислота:

$$V_c = 83,7445 - 585,9293 \times X_1 - 4,8614 \times X_2 + 1990,5236 \times X_1^2 - 1,2751 \times X_1 \times X_2 + 0,1915 \times X_2^2; \quad (1)$$

$$V_c = 34328,9449 - 495966,1 \times c - 0,6689 \times n + 1795056,974 \times c^2 - 15,3165 \times c \times n + 0,0306 \times n^2. \quad (2)$$

Для смеси мука пшеничная – аскорбиновая кислота:

$$V_c = 58,4679 - 525,9076 \times X_1 - 1,5627 \times X_2 + 1835,6314 \times X_1^2 + 2,1474 \times X_1 \times X_2 + 0,068 \times X_2^2; \quad (3)$$

$$V_c = 31544,3852 - 456793,4648 \times c + 2,5413 \times n + 1655374,049 \times c^2 - 25,794 \times c \times n + 0,0109 \times n^2. \quad (4)$$

Для смеси сахар – манка:

$$V_c = 28,5537 - 154,869 \times X_1 - 1,0144 \times X_2 + 422,6487 \times X_1^2 + 0,9418 \times X_1 \times X_2 + 0,0307 \times X_2^2; \quad (5)$$

$$V_c = 7445,7071 - 106405,4202 \times c - 2,0366 \times n + 381144,978 \times c^2 + 11,3129 \times c \times n + 0,0049 \times n^2. \quad (6)$$

Для смеси пшено – поваренная соль:

$$V_c = 33,2339 - 153,3683 \times X_1 - 2,0548 \times X_2 + 247,9507 \times X_1^2 + 4,8837 \times X_1 \times X_2 + 0,0525 \times X_1^2; \quad (7)$$

$$V_c = 4729,6656 - 64951,2894 \times c - 8,8517 \times n + 223602,1644 \times c^2 + 58,663 \times c \times n + 0,0084 \times n^2. \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим поверхности отклика, описываемые расчетными регрессионными уравнениями, представленные на рисунках 3–6.

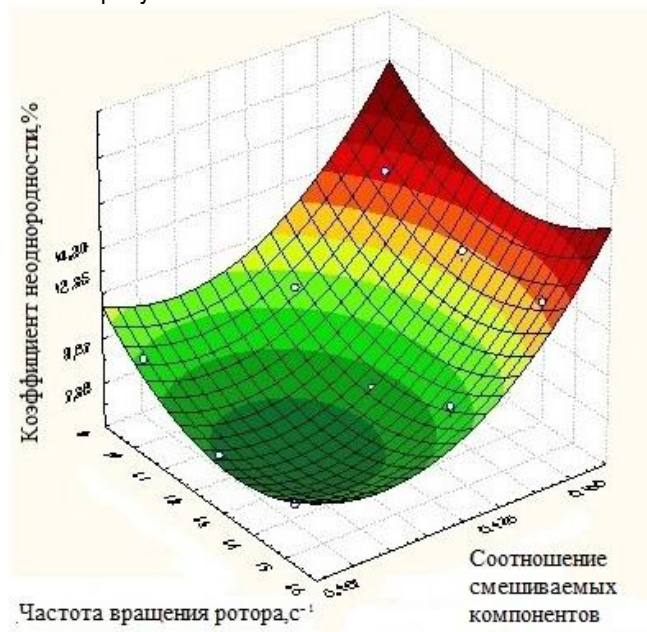


Рис. 3. Поверхность отклика для смеси сухое молоко – аскорбиновая кислота

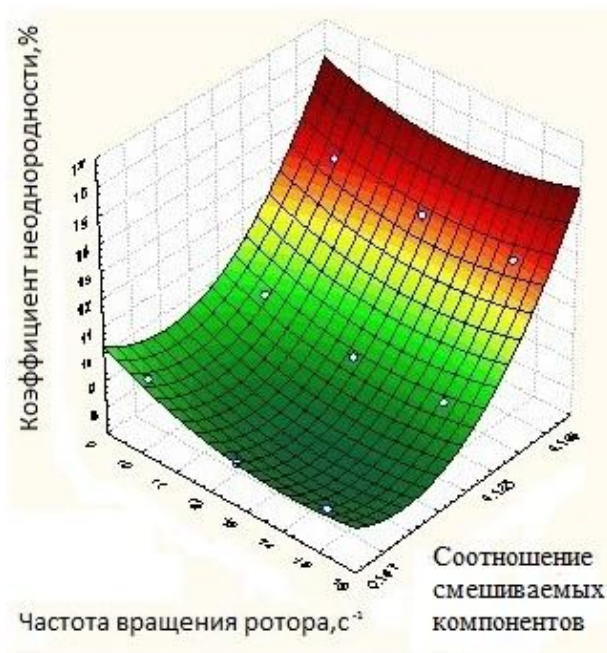


Рис. 4. Поверхность отклика для смеси мука пшеничная – аскорбиновая кислота

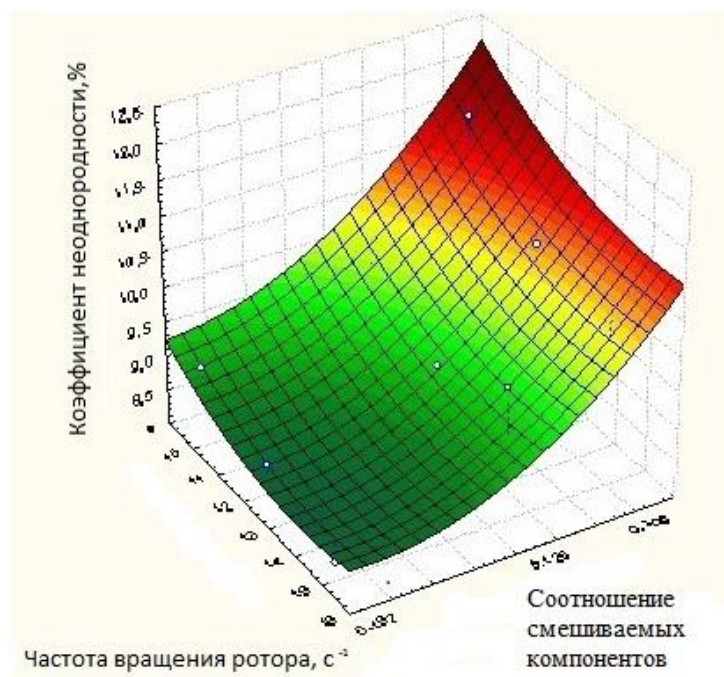


Рис. 5. Поверхность отклика для смеси сахар – манка

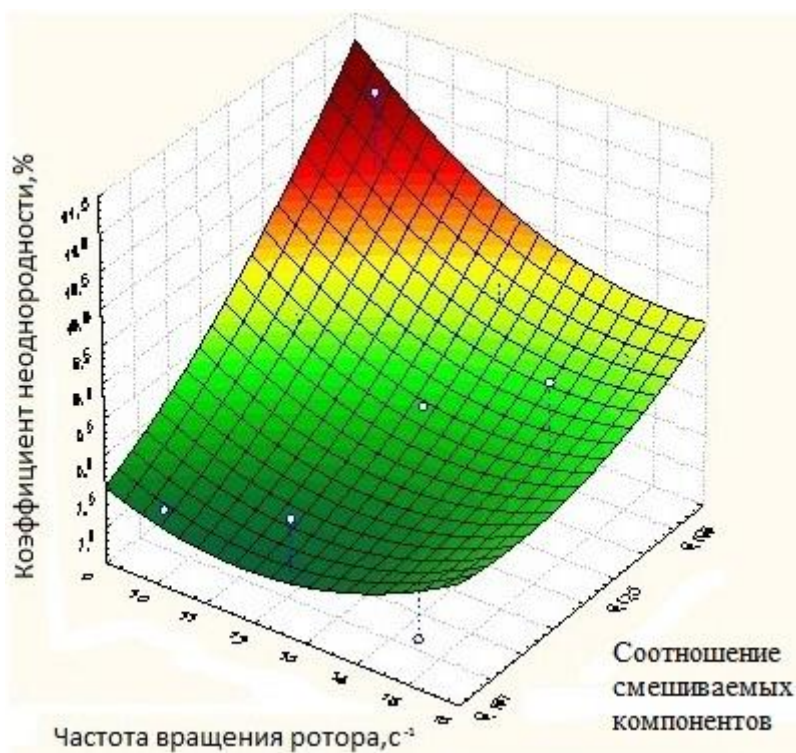


Рис. 6. Поверхность отклика для смеси пшено – поваренная соль

Анализ полученных графических интерпретаций показывает, что два последовательно установленных СНД позволяют получать смеси хорошего качества при частоте вращения их роторов 15 с^{-1} и соотношении смешиваемых компонентов 1:600. Увеличение C приводит к ухудшению качества всех смесей. При этом значения коэффициента неоднородности не превышают 14%.

Таким образом, при исследовании влияния на качество получаемых смесей технологических и режимных параметров работы двух последовательно установленных СНД выявлено, что отдельное воздействие каждой исследуемой переменной и их совместное влияние соответствует положительной корреляции с откликом.

Выводы

В ходе исследования процесса смешивания сыпучих материалов по методу последовательного разбавления смеси выяснилось, что при смешивании сыпучих компонентов, имеющих близкие физико-механические характеристики (по плотности и гранулометрическому составу) при частоте вращения роторов смесителя 15 с^{-1} и соотношении смешиваемых компонентов 1:600, получались смеси хорошего качества ($V_c=8\%$). В остальных случаях они были удовлетворительного качества, так как значения коэффициентов неоднородности не превышали 12%.

Полученные уравнения регрессии адекватно ($R^2=81\%$) описывают влияние технологических и режимных параметров СНД на качество изготавливаемых смесей.

Величина коэффициентов веса позволяет сделать вывод о том, что соотношение смешиваемых компонентов оказывает наибольшее влияние на зависимый коэффициент неоднородности, так как для всех исследуемых смесей значения $Beta$ положительны и стремятся к единице. Это свидетельствует о том, что увеличение соотношения смешиваемых компонентов до 1:1000 приводит к ухудшению качества смеси ($V_c=14\%$). Частота вращения ротора оказывает небольшое влияние на качество смешивания, так как значения коэффициентов веса отрицательны и близки к нулю. Следовательно, увеличение частоты вращения ротора до 15 с^{-1} приводит к повышению качества готовых смесей.

Поэтому разработанный смесительный агрегат целесообразно использовать для получения смесей с соотношением компонентов порядка 1:500...1000 в пищевой, сельскохозяйственной, химической и строительной отраслях промышленности.

Литература

1. Бородулин Д.М., Иванец В.Н. Развитие смесительного оборудования центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: моногр. – Кемерово, 2008. – 152 с.
2. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования экспериментов. – М.: ДеЛи Принт, 2005. – 296 с.
3. Елисеева И.И. Статистика: учеб. для вузов. – П.: Питер, 2010. – 360 с.
4. Пат. 2207186 Российская Федерация, МПК В01 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 В01 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.

