

Д.М. Бородулин, А.Б. Шушпанников, Л.А. Войтикова

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ МНОЖЕСТВЕННОГО РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Целью данной статьи является разработка новой конструкции центробежного смесителя, обладающего регулируемой инерционностью, для получения сухих многокомпонентных композиций с соотношением смешиваемых компонентов от 1:75 до 1:125. Исследованы две конструкции одноконусных центробежных смесителей непрерывного действия для получения смесей сухих дисперсных материалов. На основе анализа множественной регрессии определены рациональные значения некоторых технологических и конструктивных параметров, оказывающих влияние на качество исследуемых смесей в модернизированном аппарате по сравнению с базовой конструкцией.

Центробежный смеситель, сыпучий материал, множественная регрессия.

Введение

Концепции государственной политики в области здорового питания населения РФ предусматривают создание пищевой продукции, обогащенной витаминами, минеральными и биологически активными добавками. При этом главное внимание обращается на качество пищевых продуктов и их соответствие медико-биологическим требованиям. Это особенно важно для Кузбасса, где неблагоприятная экологическая обстановка осложняется несбалансированностью рациона и отсутствием в нем необходимого количества витаминов, микро- и макроэлементов, что вызывает необходимость обогащения продуктов питания биологически ценными компонентами и освоение новых технологий их получения.

Аналогичную проблему приходится решать в аграрно-промышленном комплексе при производстве комбикормов, ЗЦМ сухим способом, премиксов, БВД, различных шихт для получения стекла, искусственных алмазов и композиционных материалов. Поэтому разработка эффективных, непрерывно действующих смесительных агрегатов нового поколения для переработки мелкозернистых и дисперсных материалов с большой разницей содержания их в смеси является актуальной научной задачей, представляющей практический интерес для сельскохозяйственных, пищевых, химических и строительных отраслей.

Процессы смешения широко используются во многих отраслях промышленности для приготовления сыпучих композиций из дисперсных материалов, которые можно осуществлять в непрерывном или периодическом режимах. Переход на аппаратное оформление стадии смешивания по непрерывной схеме дает возможность автоматизировать процесс, уменьшить загрязнение производственных помещений и окружающей среды пылевыми выбросами, а также увеличить производительность труда при одновременном снижении энергопотребления, металлоемкости и себестоимости смеси. Например, конструкции, разработанные с участием авторов [4–6], обладают производительностью 400 кг/ч при энергопотреблении не более 0,6 (Вт×ч)/кг, в то время как у применяемого в промышленности оборудования этот показатель 0,9÷1,1 (Вт×ч)/кг. Повышение эффектив-

ности и интенсивности смешивания достигается за счет проведения процесса в тонких и разреженных слоях. К такому оборудованию относятся центробежные смесители с рабочим органом в виде усеченного конуса, закрепленным на вертикальном валу.

Целью данной статьи является разработка новой конструкции центробежного смесителя (ЦС), обладающего регулируемой инерционностью, для получения сухих многокомпонентных композиций с соотношением смешиваемых компонентов от 1:75 до 1:125 на основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса смешивания.

На основе обработки результатов были получены математические модели ЦС новой конструкции, позволяющие проанализировать возможность получения смесей заданного качества с учетом его инерционных, геометрических и технологических параметров работы.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследований взяты два одноконусных центробежных смесителя непрерывного действия. Первый аппарат состоит из элементов 1–8, второй – дополнительно содержит элементы 9–11 (рис. 1).

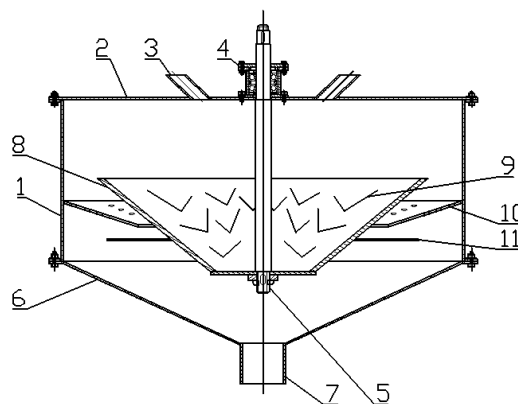


Рис. 1. Одноконусный центробежный смеситель непрерывного действия: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – загрузочные патрубки; 4 – подшипниковый узел; 5 – приводной вал; 6 – коническое днище; 7 – разгрузочный патрубок; 8 – конический ротор; 9 – углообразные турбулизаторы; 10 – перфорированные направляющие; 11 – рассеивающий диск

В первом смесителе [1] на вращающемся валу 5 закреплен усеченный полый гладкий конус 8, внутри которого на малое основание подают ингредиенты через загрузочные патрубки 3. За счет центробежной силы частицы начинают спиралеобразно скользить по внутренней поверхности конуса и смешиваться в разреженном слое. Готовый продукт сбрасывается на стенки корпуса 1, оседает вдоль них, скатывается по коническому днищу 6 и удаляется из аппарата через разгрузочный патрубок 7.

В модернизированном смесителе на внутренней поверхности конуса 8 дополнительно установлены углообразные турбулизаторы 9, которые усложняют траектории движения частиц сыпучего материала по его поверхности. Полученная композиция оседает по внутренней поверхности корпуса 1 на перфорированные направляющие 10. Часть потока стекает по направляющим на рассеивающий диск 11, закрепленный на внешней поверхности ротора 8, вторая – проходит через отверстия, выполненные в теле направляющих 10. С помощью диска 11 частицы отбрасываются центробежной силой к стенкам корпуса 1, где пересекаются с потоком, прошедшим через отверстия. Элементы 9–11 обуславливают дополнительное смешивание ингредиентов и тем самым повышают качество готового продукта.

С целью выявления степени влияния числа турбулизаторов h , частоты вращения ротора n и соотношения ингредиентов C на качество двухкомпонентных смесей (поваренная соль – манная крупа и сахар-песок – пшено), оцениваемое коэффициентом вариации V_c :

$$V_c = \frac{S}{\bar{C}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где S – выборочное среднее квадратическое отклонение содержания ключевого компонента в пробах, взятых из смеси; \bar{C} – выборочное среднее значение концентрации ключевого компонента в пробах.

Методики планирования экспериментов и обработки их результатов изложены в [2].

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов варьировались следующие параметры: количество углообразных отражателей h в диапазоне (4÷12 шт.), частота вращения ротора n (750÷950 об/мин), соотношение смешиваемых компонентов C (1:75÷1:125). Базовые (нулевые) точки и шаги варьирования приведены в табл. 1.

Согласно матрице плана с соблюдением рандомизации принимались режимные и конструктивные параметры аппарата. Затем устанавливали требуемую частоту вращения ротора и подавали ингредиенты. После выхода смесителя на стационарный режим работы осуществляли отбор проб на выходе из аппарата в количестве 30 шт. для каждого эксперимента.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования

Фактор и его обозначение	Верхний уровень	Нижний уровень	Центр плана	Интервал варьирования
Количество углообразных турбулизаторов h	12	4	8	4
Частота вращения ротора n	950	750	850	100
Соотношение смешиваемых компонентов C	1:125	1:75	1:100	1:25

Далее анализировали качество проб смеси с помощью ситового анализа, по различию гранулометрического состава, химическим способом с помощью поляриметрического метода (определение сахарозы) и ионометрическим методом (определение концентрации соли). Для получения более точного значения измеряемого параметра на каждом режиме работы проводилась серия опытов от 3 до 5. Усредненные результаты коэффициента неоднородности для исследуемых смесей (соль – манная крупа, сахар – пшено) приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты экспериментов, полученные на первой конструкции ЦС

Названия факторов и их значения			Коэффициент неоднородности V_c , % для смесей	
C	n	h	соль – манная крупа	сахар – пшено
1:75	750	0	19,7	18,2
1:125	750	0	23,4	22,8
1:100	750	0	22,5	23,4
1:75	950	0	18,3	17,6
1:125	950	0	24,2	23,7
1:100	950	0	23,7	22,9
1:75	850	0	19,2	18,5
1:125	850	0	24,1	21,4
1:100	850	0	22,1	19,8

При сопоставлении табл. 2 и 3 видно, что смеситель модернизированной конструкции позволяет получать смеси с коэффициентом неоднородности ($V_c \approx 10\%$) почти в 2 раза меньшим, чем на базовой конструкции ($V_c \approx 19\%$). Это свидетельствует о положительном влиянии углообразных турбулизаторов и рассеивающего диска на конус СНД при смешении обеих смесей.

Столь большая величина V_c обусловлена конструкцией смесителя, которая имеет всего 4 углообразных турбулизатора в роторе, состоящем всего из одного конуса, а также соотношением смешиваемых компонентов 1:125. Кроме того, при больших частотах вращения ротора частицы исследуемых материалов подвергаются частичному измельчению.

Таблица 3

Результаты экспериментов,
полученные на второй конструкции ЦС

Названия факторов и их значения			Коэффициент неоднородности V_c , %, для смесей	
C	n	h	соль – манная крупа	сахар – пшено
1:75	750	4	15,24	13,16
1:125	750	4	17,93	21,34
1:100	750	4	16,84	15,77
1:75	950	4	14,36	12,35
1:125	950	4	17,16	19,54
1:100	950	4	15,52	14,15
1:75	850	4	14,94	12,97
1:125	850	4	17,36	20,35
1:100	850	4	15,88	14,94
1:75	750	8	11,7	10,17
1:125	750	8	13,75	16,83
1:100	750	8	12,67	11,72
1:75	950	8	9,16	10,01
1:125	950	8	11,5	17,07
1:100	950	8	10,11	11,46
1:75	850	8	9,76	9,65
1:125	850	8	11,91	14,84
1:100	850	8	11,29	10,98
1:75	750	12	10,37	9,6
1:125	750	12	13,6	13,59
1:100	750	12	12,45	11,46
1:75	950	12	9,87	9,2
1:125	950	12	11,93	13,59
1:100	950	12	10,53	11
1:75	850	12	9,47	9,52
1:125	850	12	12,55	13,83
1:100	850	12	9,66	11,27

Под действием воздушных потоков образовавшиеся мелкие компоненты начинают витать над ротором, что приводит к сегрегации смеси и, как следствие, к ухудшению конечного продукта. Наилучшие показатели качества исследуемых смесей получились в результате смешения при частоте вращения ротора 850 об/мин, количестве углообразных турбулизаторов, равном 12, и соотношении смешиваемых компонентов 1:75.

Для оценки функциональной зависимости между независимыми функциональными переменными X_1 , X_2 , X_3 (представленными в табл. 5 и 6) и откликом V_c воспользовались методом множественного регрессионного анализа [3].

Результаты обработки опытных данных для исследуемых смесей проведены в интегрированной системе комплексного статистического анализа Statistica и представлены в табл. 4.

Таблица 4

Краткие сведения регрессионного анализа

	Значения анализа	
	Смесь сахар – пшено	Смесь соль – манная крупа
Множественный R	0,94547	0,93461
Множественный R^2	0,89391	0,87350
Скорректированный R^2	0,88396	0,86164
F -критерий	89,87548	73,65557
p -значение	0,00000	0,00000
Стандартная ошибка оценки	1,55626	1,76015

В таблице даны показатели качества подобранной модели регрессии. R – коэффициент множественной корреляции. R^2 – коэффициент детерминации – чрезвычайно важная характеристика, показывающая долю общего разброса (относительно сред-независимой переменной), которая объясняется построенной регрессией. Итак, например, для смеси сахар – пшено R^2 равен 0,89391. Это значит, что построенная регрессия объясняет более 89 % разброса значений переменной относительно среднего. Далее рассмотрим значения F -критерия и уровня значимости p . F -критерий используется для проверки гипотезы о значимости регрессии. В нашем случае $F = 89,9$; $p = 0,00$.

Следовательно, построенная регрессия высоко значима, так как уровень значимости для исследуемых смесей равен нулю. Стандартная ошибка оценки показывает рассеяние наблюдаемых значений относительно регрессионной прямой.

Для того чтобы узнать, какие из независимых переменных (C , n или h) дают больший вклад в предсказание коэффициента неоднородности, необходимо изучить регрессионные (или B) коэффициенты. Для этого представим в табл. 5 и 6 результаты множественной регрессии.

Таблица 5

Результаты множественной регрессии для смеси сахар – пшено

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(23)	p-level
Свободный член			10,6	3,015	3,53	0,001284
X_1 – переменная C	0,51	0,057	0,113	0,012	8,91	0,000000
X_2 – переменная n	-0,041	0,057	-0,002	0,003	-0,71	0,478294
X_3 – переменная h	-0,793	0,057	-0,79	0,057	-13,77	0,000000

Результаты множественной регрессии для смеси соль – манная крупа

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(23)	p-level
Свободный член			19,3	3,41	5,67	0,000003
X1 – переменная <i>C</i>	<i>0,27</i>	<i>0,06</i>	<i>0,062</i>	<i>0,014</i>	<i>4,32</i>	<i>0,000138</i>
X2 – переменная <i>n</i>	-0,10	0,06	-0,005	0,003	-1,60	0,119085
X3 – переменная <i>h</i>	<i>-0,88</i>	<i>0,06</i>	<i>-0,92</i>	<i>0,06</i>	<i>-14,1</i>	<i>0,000000</i>

В табл. 5 и 6 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 независимой переменной в предположение зависимой переменной *Vc*. Как видно из таблиц результатов, статически значимыми являются переменные *C* и *h* (их значения в таблицах представлены курсивом), значения которых самые большие, т.е. стремятся к единице. Именно они оказывают сильное влияние (в особенности *h*, при котором Beta = 0,8–0,9) на коэффициент неоднородности. Причем для обеих смесей регрессионный коэффициент *h* отрицателен; т.е. чем больше количество углообразных турбулизаторов, тем меньше *Vc*. Вклад в регрессию для *C* положителен, поэтому чем меньше соотношение смешиваемых компонентов, тем меньше коэффициент неоднородности *Vc*. Частота вращения ротора оказывает очень маленькое влияние на качество смешивания, по крайней мере в исследуемом диапазоне, поэтому данная величина X2 была исключена из регрессионного анализа.

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

Для смеси соль – манная крупа:

$$Y = 16,7458 + 0,0227 \times X1 - 1,679 \times X3 + 0,0003 \times X2^2 - 0,0029 \times X1 \times X3 + 0,083 \times X23; \quad (2)$$

$$Vc = 16,7739 + 0,19987 \times h - 0,01684 \times C + 0,0192 \times h^2 - 0,00023 \times h \times C + 0,000008 \times C^2. \quad (3)$$

Для смеси сахар – пшено:

$$Y = 24,4135 + 0,1904 \times X1 - 1,4975 \times X3 + 0,0014 \times X2^2 - 0,001 \times X1 \times X3 + 0,0552 \times X23; \quad (4)$$

$$Vc = 25,13753 + 1,61248 \times h - 0,01497 \times C + 0,0896 \times h^2 - 0,00008 \times h \times C + 0,000006 \times C^2. \quad (5)$$

Для примера рассмотрим поверхности отклика (рис. 2 и 3), описываемые расчетными регрессионными уравнениями (2 и 4), за исключением мало значимого коэффициента X2 (то есть зависимость частоты вращения ротора на *Vc*).

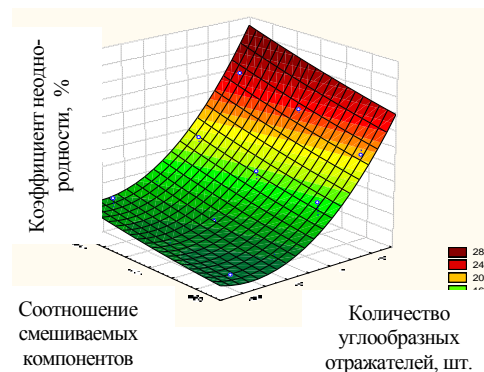


Рис. 2. Поверхность отклика для смеси соль – манная крупа

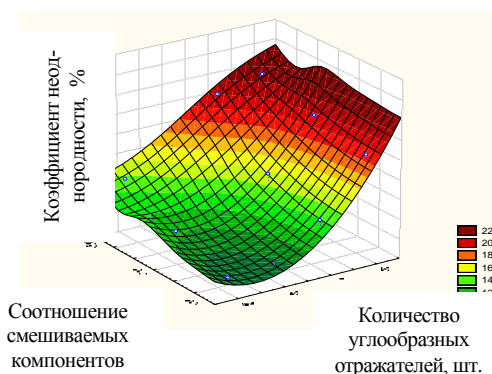


Рис. 3. Поверхность отклика для смеси сахар – пшено

Анализируя полученные графические интерпретации, можно отметить, что количество углообразных турбулизаторов *h*, равное 8–12 шт., в роторе модернизированного СНД центробежного типа оказывает наибольшее влияние на коэффициент неоднородности *Vc*, особенно при *h* = 12.

Наименьшее значение *Vc* достигается только в том случае, когда соотношение смешиваемых компонентов составляет 1:75, но и при 1:100 готовую смесь можно считать удовлетворительной, так как *Vc* для обеих смесей не превышал 12%. Увеличение *C* ведет к ухудшению качества смеси, что объясняется малым временем пребывания частиц в роторе аппарата, так как последний состоит всего из одного конуса.

Важным элементом регрессионного анализа является оценка адекватности модели, которая основывается на анализе удаленных остатков. Они определяются как стандартизованные остатки для соответствующих наблюдений, которые получились бы при исключении соответствующих наблюдений из анализа (исключение переменной X2). При проведении анализа с помощью множественной регрессии пред-

полагается, что значения остатков (наблюдаемые минус предсказанные значения) нормально распределены и функция регрессии (т.е. связь между коэффициентом неоднородности V_c и независимыми переменными C и h) в действительности линейна. Если данные предположения существенно нарушаются, то будут повышаться или понижаться оценки коэффициентов регрессии (B -коэффициентов), а также завышение или занижение значимости исследуемых переменных. Графики остатков приведены на рис. 4. Значения остатков нормально распределены, так как все точки на графиках не отклоняются от прямой и большинство из них не выходит за области граничных условий. Поэтому полученные модели для исследуемых смесей с более чем 95 % достоверности адекватно описывают опытные данные.

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

Выводы

Для приготовления смесей сыпучих материалов с соотношением смешиваемых компонентов от 1:75 до 1:100 целесообразно применять модернизированную конструкцию одноконусного СНД центробежного типа.

На основе анализа множественной регрессии определены параметры, оказывающие влияние на качество исследуемых смесей в модернизированном аппарате. Например, наибольшее влияние на коэффициент неоднородности оказывает число углообразных турбулизаторов ($Beta = 0,8-0,9$), меньшее – соотношение смешиваемых компонентов ($Beta = 0,2-0,5$) и фактически не оказывает влияния частота вращения ротора в исследуемом диапазоне.

При соотношении смешиваемых компонентов 1:100 целесообразнее проводить процесс смешения в модернизированном ЦС при частоте вращения ротора от 750 до 950 об/мин, с установкой 12 углообразных турбулизаторов. Только при этих параметрах получаемые смеси можно считать удовлетворительными ($V_c \approx 10\%$) по отношению к смесям, полученным на базовой конструкции ($V_c \approx 19\%$).

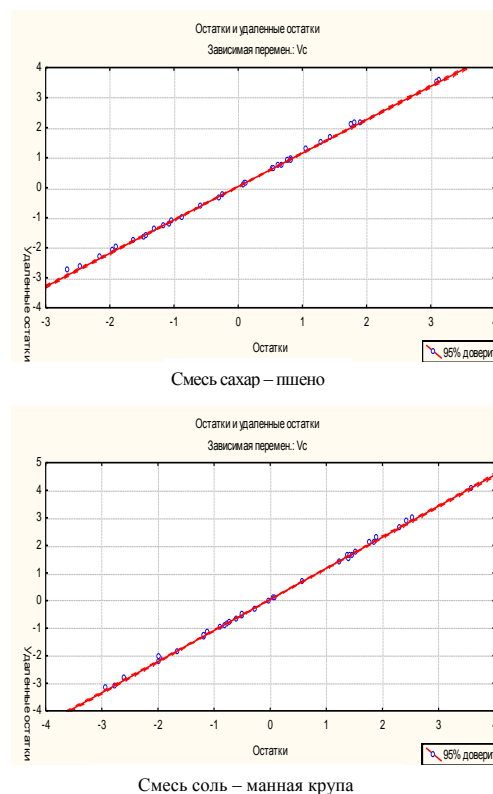


Рис. 4. Графики остатков

Список литературы

1. А.с. 2121870 Россия, МКИ В01 F7/28. Центробежный смеситель порошкообразных материалов / В.И. Пындак, Г.Г. Соломатин, И.Ф. Рязанкин. – Оpubл. в Б.И., 1998, № 32.
2. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев. – М.: Пищевая пром-сть, 1969. – 315 с.
3. Елисеева, И.И. Статистика: учебник для вузов / И.И. Елисеева. – СПб.: Питер, 2010. – 360 с.
4. Пат. 2200055 Российская Федерация, МПК В01 F7/26. Центробежный смеситель / Иванец В.Н., Ратников С.А., Иванец Г.Е., Бородулин Д.М., Белоусов Г.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО КемТИПП. – № 2000128252/12; заявл. 13.10.2000; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 7. – 10 с.
5. Пат. 2216394 Российская Федерация, МПК В01 F7/26. Центробежный смеситель / Иванец В.Н., Бакин И.А., Белоусов Г.Н., Бородулин Д.М., Волков А.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО КемТИПП. – № 2002130106/12; заявл. 10.11.2002; опубл. 20.11.2003, Бюл. № 32. – 6 с.
6. 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 ГОУ ВПО КемТИПП. – № 2008115038/15; заявл. 16.04.2008; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 3 с.

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**D.M. Borodulin, A.B. Shushpannikov, L.A. Voitikova****RESEARCH OF FUNCTIONING OF THE CENTRIFUGAL MIXER
OF CONTINUOUS ACTION BY THE METHOD OF MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS**

The purpose of given article is working out of a new construction of the centrifugal mixer possessing an controlled lag to obtain dry multicomponent compositions with a ratio of mixed components from 1:75 to 1:125. The two constructs of the centrifugal mixers of continuous action having one coneto obtain drydispersed materialsare investigated. Rational values of some technological and design parameters that influence the quality of the mixtures in a modernized apparatus are determined on the basis of multiple regression analysis, in comparison to the base construction.

Centrifugal mixer, bulk, loose material, multiple regression.

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

