

ВЗАИМОСВЯЗЬ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИНТОВОГО ВИБРАЦИОННОГО СМЕСИТЕЛЯ И ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В статье на основе уравнений материального баланса с использованием корреляционных функций показана взаимосвязь инерционных свойств подъемного вертикального винтового вибрационного смесителя и его геометрических характеристик.

Вертикальный винтовой вибрационный смеситель, сглаживающая способность, корреляционный анализ, сыпучий материал.

Введение

Одним из направлений при создании смесеприготовительных агрегатов непрерывного действия для сыпучих материалов (СМ) является стремление удешевить их изготовление и обслуживание. Для этого в их состав включают сравнительно простые по конструкции дозаторы объемного (шнековые, спиральные) и дискретно-циклического (стаканчиковые, карусельные) типов. Однако они характеризуются высокой неравномерностью подачи ингредиентов, особенно дискретные, поэтому смеситель должен в достаточной степени сглаживать флуктуации входящих потоков, чтобы достичь компромисса между конструктивной простотой и требуемым качеством готового продукта.

Традиционно инерционность смесителя повышают за счет увеличения его рабочего объема, но с ростом габаритов растут металлоемкость и энергопотребление. Более рациональным решением является введение в аппарат рециркулирующих и опережающих контуров. В этом случае при меньшем росте габаритов удается достичь больших степеней сглаживания.

Директивную организацию материальных потоков во внутриаппаратной среде удалось полноценно реализовать в прямоточных и подъемных вертикальных винтовых вибрационных смесителях (ВВВС), защищенных девятью авторскими свидетельствами и патентами на изобретения, краткое описание которых приведено в [1]. Эти смесители характеризуются высокой интенсивностью и эффективностью процесса в сравнении с большинством известных типов аппаратов. Для оценки их степени сглаживания и прогнозирования однородности готовой сыпучей композиции математические модели процессов смешивания, рассматриваемых как случайные стационарные процессы, удобно составлять на базе корреляционного анализа.

Среди всей гаммы ВВВС подъемные смесители обладают наибольшей сглаживающей способностью и стабильностью процесса. Однако до настоящего времени известны математические модели этих аппаратов с применением корреляционных функций только для нескольких частных случаев и без оценки их геометрических размеров [2–5].

Цель данной статьи – установить взаимосвязь инерционных свойств базовой конструкции ВВВС, его геометрических характеристик и параметров рециркуляции.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования выберем оригинальный лотковый винтовой вертикальный вибрационный смеситель, выполненный по патенту РФ 2181664 [6], в котором реализован перспективный способ переработки сыпучих материалов в тонком слое (20–50 мм) на винтовом рабочем органе, интенсивно виброактивирующем дисперсную систему (рис. 1). Это позволяет при небольших габаритах аппарата и потребляемой мощности существенно сократить время смешивания, в большинстве случаев не превышающее двух минут. Необходимая степень сглаживания достигается благодаря наличию внутренней (межвитковой) рециркуляции.

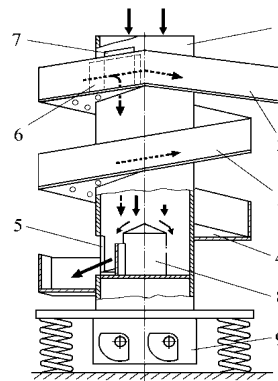


Рис. 1. Подъемный ВВВС: 1 – несущая цилиндрическая колонна; 2 – выпускной патрубок; 3 – винтовой перфорированный лоток; 4 – нижний сплошной виток; 5 – нижнее окно; 6 – заслонка; 7 – верхнее окно для внешней рециркуляции; 8 – цилиндрическая вставка; 9 – вибратор

Устройство имеет вертикальную несущую цилиндрическую колонну, на которой закреплен перфорированный, кроме нижнего витка, рабочий орган в виде винтового лотка. Колонна одновременно играет роль загрузочного бункера, куда подаются ингредиенты. Далее эта многокомпонентная полидисперсная композиция поступает через нижнее отверстие в стенке загрузочного бункера на первый (нижний) сплошной виток. На рабочем органе под влиянием винтовых колебаний полидисперсная система в процессе виброкипения и транспортирования по спирали вверх интенсивно увеличивает свою однородность по составу. Внутренняя рециркуляция создается за счет просыпания (возврата) части мате-

риала через перфорацию вышележащих витков на нижние и определяется параметрами вибрации и размером отверстий. На верхнем витке установлена заслонка, с помощью которой смеситель можно переключать на работу в периодическом режиме, полностью перекрыв выпускной патрубок. В этом случае композиция сбрасывается в загрузочный бункер, образуя замкнутый циркуляционный контур. После достижения смеси заданной однородности выпускной патрубок открывают. Использовать заслонку для создания контура внешней рециркуляции при работе аппарата в непрерывном режиме, тем более для регулировки высоты дисперсного слоя на рабочем органе, не рекомендуется.

На рис. 2 представлена схема движения сыпучего материала в подъемном винтовом смесителе. В соответствии с ней из дозирующего блока в аппарат поступают ингредиенты с суммарным расходом X_0 . Кроме этого, на первый виток рабочего органа падает материал с последнего (верхнего) витка в количестве βX_n и часть материала в количестве $\alpha_1 X_1$ просыпается через перфорацию второго. Выходит с первого витка поток расходом X_1 . На второй виток поступает X_1 и $\alpha_2 X_2$, а выходит X_2 и $\alpha_1 X_1$ и т.д. На верхний виток поступает лишь X_{n-1} , а выходит X_n и $\alpha_{n-1} X_{n-1}$. Заслонка делит поток X_n таким образом, чтобы на выходе из смесителя получилось $X_B = X_0$.

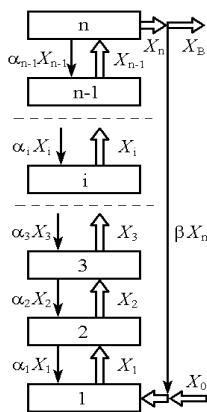


Рис. 2. Схема движения материальных потоков в аппарате, выполненном по патенту РФ 2181664: $X_i = X_i(t)$ – случайная величина, характеризующая массовый расход материала, выходящего с витка; $\alpha_i X_i = X_{i+1}^{ome}$ – расход материала через отверстия витков (внутренняя рециркуляция); βX_n – расход контура внешней рециркуляции; α_i и β – коэффициенты внутренней и внешней рециркуляции; прямоугольники – витки рабочего органа; стрелки – направление движения СМ

Расход βX_n зависит от степени открытия верхнего окна 7 (см. рис. 1). Расход материала через отверстия витков $\alpha_i X_i = X_{i+1}^{ome}$ – от параметров вибрации, от площади, размеров и формы перфорации, от свойств и высоты слоя материала на лотке. Если в стационарном режиме работы устройства положение заслонки можно менять, регулируя поток βX_n , то потоки $\alpha_i X_i$ практически постоянны.

Примем, что каждый виток аппарата является ячейкой идеального смешения, и запишем систему уравнений материального баланса, отражающую процесс движения материальных потоков в ВВВС с целым значением числа витков:

$$\begin{cases} X_1 = X_0 + \alpha_1 X_1 + \beta X_n \\ X_2 = X_1 - \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 = (1 - \alpha_1) X_1 + \alpha_2 X_2 \\ X_3 = X_2 - \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 = (1 - \alpha_2) X_2 + \alpha_3 X_3 \\ \dots \\ X_i = (1 - \alpha_{i-1}) X_{i-1} + \alpha_i X_i \\ \dots \\ X_{n-1} = (1 - \alpha_{n-2}) X_{n-2} + \alpha_{n-1} X_{n-1} \\ X_n = (1 - \alpha_{n-1}) X_{n-1} \\ X_B = (1 - \beta) X_n \end{cases} \quad (1)$$

где X_0 – массовый расход дисперсной фазы на входе в смеситель, кг/с; X_B – расход дисперсной фазы, вышедшей из смесителя, кг/с; X_i – расход дисперсной фазы, сошедшей с i -го витка, кг/с; $i = 1, 2, \dots, n$; α_i – коэффициенты внутренней рециркуляции, $0 \leq \alpha_i < 1$; β – коэффициент внешней рециркуляции, $0 \leq \beta < 1$; n – целое число витков рабочего органа.

Для установления влияния рециркуляции на инерционные свойства аппарата используем корреляционный подход. При этом предположим, что взаимная корреляция потоков отсутствует ($Kx_i x_j = 0$ при $i \neq j$), т.е. нет процесса усреднения смеси при ее движении под действием вибрации по рабочему органу. Тогда система, определяющая корреляционные функции витков, будет иметь вид:

$$\begin{cases} Kx_1(\tau) = Kx_0(\tau) + \alpha_1^2 Kx_1(\tau) + \beta^2 Kx_n(\tau) \\ Kx_2(\tau) = (1 - \alpha_1)^2 Kx_1(\tau) + \alpha_2^2 Kx_2(\tau) \\ Kx_3(\tau) = (1 - \alpha_2)^2 Kx_2(\tau) + \alpha_3^2 Kx_3(\tau) \\ \dots \\ Kx_i(\tau) = (1 - \alpha_{i-1})^2 Kx_{i-1}(\tau) + \alpha_i^2 Kx_i(\tau) \\ \dots \\ Kx_{n-1}(\tau) = (1 - \alpha_{n-2})^2 Kx_{n-2}(\tau) + \alpha_{n-1}^2 Kx_{n-1}(\tau) \\ Kx_n(\tau) = (1 - \alpha_{n-1})^2 Kx_{n-1}(\tau) \\ Kx_B(\tau) = (1 - \beta)^2 Kx_n(\tau) \end{cases} \quad (2)$$

где $Kx_0(\tau)$, $Kx_B(\tau)$ – корреляционные функции входящего и выходящего из смесителя потоков соответственно; $Kx_i(\tau)$ – корреляционная функция потока i -го витка; τ – интервал корреляции.

С целью унификации и повышения стабильности процесса смешивания на вибрирующей поверхности в реальных конструкциях ВВВС все перфорированные витки обычно выполняют тождественными. При этом суммарный расход СМ через их отверстия при неизменных параметрах вибрации можно с достаточной для практических целей точностью считать одинаковым:

$$\alpha_i X_i = X_{i+1}^{ome} = const. \quad (3)$$

Приняв значения коэффициентов внутренней рециркуляции равными ($\alpha_i = \alpha$, $i = 1, 2, \dots, n-1$), изобразим на рис. 3 тонкой линией изменение высоты слоя СМ на витках смесителя. В соответствии с системой (1) уровень слоя растет на первом нижнем витке на величину αX_1 , на средних витках он постояен $X_1 = X_2 = \dots = X_{n-1} = X_i$, а на верхнем витке

вновь уменьшается на ту же величину αX_{n-1} . Высота дисперсного слоя на витках тем выше, чем больше значения коэффициентов α и β .

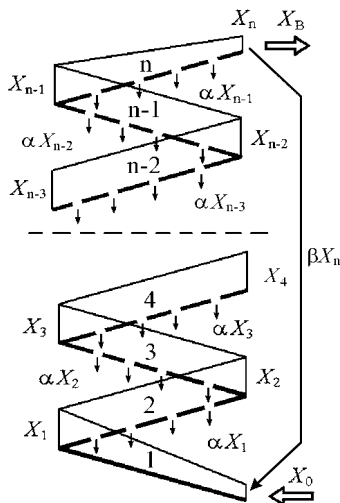


Рис. 3. Модифицированная схема движения материальных потоков в аппарате

Установим зависимость между коэффициентами рециркуляции α и β и массовыми расходами X_i . Для этого с учетом равенства коэффициентов внутренней рециркуляции и высоты слоя на средних витках запишем систему (1) в форме

$$\begin{cases} X_1 = X_0 + \alpha X_1 + \beta X_n \\ X_1 = X_2 = \dots = X_{n-1} = X_i \\ X_n = (1 - \alpha) X_i \\ X_B = (1 - \beta) X_n = X_0 \end{cases} \quad (4)$$

В результате ряда преобразований системы (4) окончательно получим выражение, определяющее отношение массовых расходов СМ X_i по рабочему органу к входному потоку X_0 :

$$\frac{X_i}{X_0} = \frac{1}{(1 - \alpha)(1 - \beta)} \quad (5)$$

Массовый расход X_i растет с увеличением значений α и β . Он связан с шириной лотка b , высотой виброкипящего слоя h_i СМ, его плотностью ρ и скоростью вибротранспортирования v зависимостью

$$X_i = bh_i \rho v, \quad (6)$$

где произведение bh_i – живое сечение потока.

Зная численные значения X_0 , α , β , X_i , ρ , v и принимая при конструировании смесителя высоту слоя h фиксированной в пределах 20–50 мм, можно рассчитать ширину лотка b .

Изобразим на рис. 4 зависимость (5) при $\alpha = 0$, из которой видно, что, например, при увеличении β от 0 до 0,5 при прочих неизменных параметрах ширина лотка b увеличится в 2 раза. И, как следствие, увеличится диаметр смесителя.

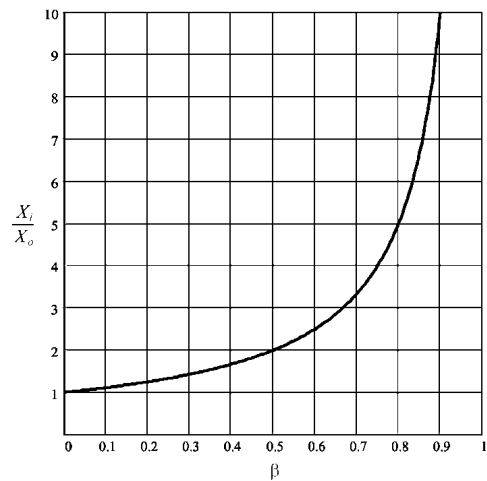


Рис. 4. Влияние коэффициента рециркуляции β на рост массового расхода

Зависимость $X_i / X_0 = f(\beta)$ (см. рис. 4) для демонстрации выбрана не случайно. Долгое время внешнему контуру рециркуляции придавалось большое значение в плане возможности регулирования инерционных свойств ВВВС. Рассмотрим эту проблему подробнее.

Чтобы понять влияние β на α , перепишем формулу

$$X_i = X_0 + \alpha \cdot X_i + \beta X_n$$

из системы (4) с учетом (3) иначе:

$$X_i = X_0 + X_{i+1}^{omeg} + \beta X_n.$$

Если увеличить степень открытия окна 7 (см. рис. 1), пропорционально увеличится высота слоя СМ по всему рабочему органу (см. рис. 3), т.е. расход X_i возрастет на величину $\Delta \beta X_n$. При этом коэффициент α уменьшит свое значение на $\Delta \alpha$, так как $X_{i+1}^{omeg} = const$:

$$\alpha - \Delta \alpha = \frac{X_{i+1}^{omeg}}{X_i + \Delta \beta X_n} \quad (7)$$

Отсюда видно, что увеличение β вызывает уменьшение α .

Теперь приступим к расчету системы корреляционных функций (2) для установления влияния значений коэффициентов рециркуляции α и β на инерционные свойства аппарата. Используя равенство коэффициентов внутренней рециркуляции $\alpha_i = \alpha$, перепишем систему (2) следующим образом:

$$\begin{cases} Kx_n(\tau) = (1 - \beta)^2 \cdot Kx_n(\tau) \\ Kx_n(\tau) = (1 - \alpha)^2 Kx_{n-1}(\tau) \\ Kx_{n-1}(\tau) = \frac{(1 - \alpha)^2}{1 - \alpha^2} Kx_{n-2}(\tau) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} Kx_{n-2}(\tau) \\ \dots \\ Kx_2(\tau) = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} Kx_1(\tau) \\ Kx_0(\tau) = (1 - \alpha)^2 Kx_1(\tau) - \beta^2 \cdot Kx_n(\tau) \end{cases} \quad (8)$$

Сначала запишем связь между корреляционными функциями потоков первого и n -го витков:

$$Kx_n(\tau) = (1-\alpha)^2 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{(n-1)} Kx_1(\tau).$$

Тогда

$$Kx_0(\tau) = (1-\alpha)^2 Kx_1(\tau) - \beta^2 (1-\alpha)^2 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{(n-1)} Kx_1(\tau)$$

или

$$Kx_1(\tau) = \frac{Kx_0(\tau)}{(1-\alpha)^2 \left[1 - \beta^2 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{(n-1)} \right]}$$

Окончательно получим

$$Kx_B(\tau) = \frac{(1-\beta)^2 (1-\alpha)^2 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{(n-1)}}{(1-\alpha)^2 \left[1 - \beta^2 \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^{(n-1)} \right]} Kx_0(\tau) \quad (9)$$

Известно, что корреляционная функция при интервале корреляции $\tau = 0$ соответствует дисперсии случайной величины, т.е. $Kx(0) = \sigma_x^2$. Тогда $Kx_0(0) = \sigma_{X0}^2$ и $Kx_B(0) = \sigma_{XB}^2$. В свою очередь, степень сглаживания S равна отношению дисперсий входного потока к выходному:

$$S = \frac{\sigma_{X0}^2}{\sigma_{XB}^2} = \frac{Kx_0(0)}{Kx_B(0)} \quad (10)$$

На основе формул (9) и (10) окончательно запишем:

$$S = \frac{(1+\alpha)^{(n-1)} - \beta^2 (1-\alpha)^{(n-1)}}{(1-\beta)^2 (1-\alpha)^{(n-1)}} \quad (11)$$

Дополнительно рассмотрим частные случаи.

При $\alpha = 0$, $\beta \neq 0$ и произвольном n :

$$S = \frac{1 - \beta^2}{(1-\beta)^2} = \frac{1+\beta}{1-\beta} \quad (12)$$

При $n = 2$, $\alpha \neq 0$ и $\beta = 0$:

$$S = \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \quad (13)$$

При $\alpha \neq 0$ и $\beta = 0$:

$$S = \frac{(1+\alpha)^{(n-1)}}{(1-\alpha)^{(n-1)}} = \left[\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right]^{(n-1)} \quad (14)$$

Из (12), (14) можно видеть, что влияние α на S более существенно, нежели влияние β .

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 показан фрагмент зависимости $S(\alpha, n)$ (14) для $\alpha = 0 \dots 0,5$ и $n = 2, 3$ и 4 , а в табл. 1 приведены значения S для более широкого диапазона α и n .

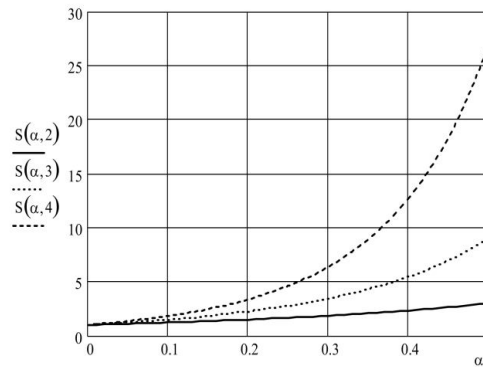


Рис. 5. Зависимость степени сглаживания $S(\alpha, n)$ от внутренней рециркуляции α и числа витков n рабочего органа BBBC

Таблица 1

Значения степени сглаживания $S(\alpha, n)$

α/n	2	3	4	5	6	7	8
0,2	1,5	2,25	3,375	5,062	7,594	11,391	17,086
0,3	1,857	3,449	6,405	11,895	22,092	41,027	76,193
0,4	2,333	5,444	12,704	29,642	69,165	161,38	376,56
0,5	3	9	27	81	243	729,0	2187
0,6	4	16	64	256	1024	4096	16380
0,7	5,667	32,111	181,96	1031	5843	33110	1,88·10 ⁶
0,8	9	81	729	6561	59050	531400	4,78·10 ⁶

Анализ выражений (11)...(14), рис. 5 и табл. 1 показывает, что инерционность винтового смесителя можно повышать путем увеличения коэффициентов рециркуляции α , β и числа витков n . При этом из (5), (6) следует, что первое направление ведет к увеличению диаметра аппарата. Второе направление, очевидно, ведет к увеличению высоты. Но, учитывая, что уровень влияния коэффициента α на степень сглаживания S существенно, чем влияние β , необходимо отдать предпочтение коэффициенту внутренней (межвитковой) рециркуляции α . Например, при $\beta = 0,2 \dots 0,8$ и $\alpha = 0$ $S = 1,5 \dots 9$, в то же время при $\beta = 0$, $\alpha = 0,2 \dots 0,8$ и $n = 2 \dots 8$ $S = 1,5 \dots 4,78 \cdot 10^6$ (см. табл. 1). Поэтому с учетом зависимости (7) $\alpha = f(\beta)$ мы не рекомендуем использовать контур внешней рециркуляции при работе аппарата в непрерывном режиме для повышения его инерционности или для регулировки высоты СМ на рабочем органе, т.е. значение β должно быть равно или близко к нулю.

Возникает вопрос: за счет изменения какого параметра целесообразней повышать степень сглаживания S – коэффициента α или числа витков n ?

Однозначно ответить трудно, так как результаты расчетов, приведенные в табл. 1, скорее отражают тенденцию изменения $S(\alpha, n)$, нежели значения, на которые следует опираться в связи с большим количеством допущений, принятых при составлении математической модели. Тем не менее можно рекомендовать принимать величину параметра α в диа-

пазоне от 0,3 до 0,7. При его значениях до 0,3 незначительное увеличение живого сечения потока можно компенсировать повышением уровня слоя, а при $\alpha > 0,7$, как следует из (5), (6), резко возрастает ширина лотка. Внутри указанного диапазона происходит наиболее широкий охват значений степеней сглаживания, пригодных для любых условий. Не следует также стремиться к максимальному увеличению α в этом интервале, так как особенностью режима колебаний винтового рабочего органа является переменная амплитуда смещений участков, находящихся на разном удалении от центральной оси.

Разные параметры вибрации во внутренней зоне лотка и на его периферии ухудшают протекание процесса смешивания.

Основываясь на полученных результатах, можно рекомендовать при проектировании ВВВС делать уклон в сторону увеличения числа витков, а не коэффициента внутренней (межвитковой) рециркуляции. В целом это позволит, соблюдая принцип унификации, создавать универсальные конструкции винтовых вибрационных смесителей, охватывающих широкие условия.

Список литературы

1. Шушпанников, А.Б. Смесительные агрегаты вибрационного типа для дисперсных материалов: монография / А.Б. Шушпанников, Г.Е. Иванец; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2008. – 152 с.
2. Иванец, Г.Е. Разработка смесительных агрегатов вибрационного типа для получения комбинированных продуктов. – Кемерово, 2001. – 156 с.
3. Баканов, М.В. Разработка и исследование непрерывно действующего смесительного агрегата вибрационного типа для получения комбинированных продуктов питания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2001.
4. Матвеев, Ю.А. Разработка вибрационного смесительного агрегата с направленной организацией материальных потоков для получения комбинированных продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2001.
5. Золин, А.Г. Разработка и исследование смесителя непрерывного действия вибрационного типа для получения комбинированных продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2009.
6. Патент 2181664 РФ, МКИ В 28 С 5/04. Вибрационный смеситель / Иванец В.Н., Иванец Г.Е., Шушпанников А.Б. и др. – № 2000104249/03, заявл. 21.02.2000; опубл. 27.04.2002, бюл. № 12.

ГОУ 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

A.B. Shushpannikov, M.V. Bakanov

Interrelation of inertial properties of the screw type vertical vibration mixer and its geometric dimensions

On the basis of material balance equations and correlation functions the interrelation of inertial properties of the lifting screw type vertical vibration mixer and its geometric dimensions has been shown in this paper.

Screw type vertical vibration mixer, smoothing ability, correlation analysis, bulk.

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

