УДК 66.099.2:S1

А.М. Попов, М.А. Макковеев, Е.Б. Асташенко, А.В. Чупин

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ИНСТАНТИРОВАННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ В ТАРЕЛЬЧАТЫХ ГРАНУЛЯТОРАХ С АКТИВАТОРОМ

Предложена гипотеза механизма гранулирования инстантированных полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором, отражающая стохастическую природу процесса. В соответствии с ней разработана математическая модель. Она включает в себя две системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова и совокупность уравнений, связывающих интенсивность преобразования материала с параметрами гранулятора и свойствами материала. Исходя из особенностей модели, результатов экспериментального исследования процесса разработана процедура ее параметрической идентификации.

Идентификация, инстантированный полидисперсный продукт, активатор, математическая модель, тарельчатый гранулятор.

Введение

Последние годы характеризуются расширением производств, совершенствованием технологий и увеличением ассортимента концентратов в виде быстрорастворимых или быстро восстанавливаемых сухих порошкообразных смесей для напитков. Анализ опубликованных работ в данной области свидетельствует о том, что производство инстантированных полидисперсных смесей в России сдерживается низкой производительностью на завершающих этапах их производства – гранулировании и сушке. Использование на этапе гранулирования тарельчатых грануляторов с активатором [1] позволяет многократно увеличить производительность данного процесса, уменьшает разброс получаемого продукта по гранулометрическому составу. Одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности процесса гранулирования в них является оптимизация режимов, технологических и конструктивных параметров и направленное регулирование структурно-механических свойств комкуемых дисперсных материалов для достижения заданного качества гранулята при максимально возможной производительности.

Материалы и методы

Наименее затратным и эффективным методом поиска оптимальных конструктивно-режимных параметров тарельчатого гранулятора с активатором для инстантированных полидисперсных продуктов с разными структурно-механических свойствами является его математическое моделирование и исследование с использованием современной компьютерной техники. Анализ априорной информации [2–5] и результатов экспериментального исследования процесса показал, что гранулирование полидисперсных материалов в тарельчатом грануляторе с активатором целесообразно рассматривать как марковский процесс возникновения, роста и разрушения гранул. Это обусловлено тем, что в процессе гранулирования высокодисперсный исходный материал превращается в зародыши, гранулы различного размера, гарнисаж. При этом скорость формирования зародышей и мелких гранул, их рост, особенно на начальной стадии процесса, во многом зависят от режима работы активатора. На последующих стадиях крупные и средние гранулы, попадая в область действия активатора, разрушаются им, превращаясь в зародыши и мелкие гранулы. Гарнисаж, подрезанный ножами, также переходит в зародыши и мелкие гранулы. Завершается процесс получением гранул, большинство из которых соответствуют заданному размеру, плотности и влажности.

Параметрическая идентификация математической модели динамики процесса выполнялась с использованием результатов экспериментального исследования гранулирования многокомпонентной смеси полидисперсных материалов, включающей в себя шрот клюквы и деминерализованной подсырной сыворотки, сахарную пудру и ряд других ингредиентов.

Результаты и их обсуждение

Время зарождения гранулы является случайной величиной, подтверждающейся пуассоновским процессом с параметром $\lambda = 1/t_{ср}$, где $t_{ср}$ – среднее время зарождения гранулы и ξ – случайная величина, характеризующая время зарождения гранулы. Исходя из этого для построения математической модели динамики процесса выбран стохастический подход. При этом весь полидисперсный материал, находящийся в каждый момент времени в тарели гранулятора, по гранулометрическому составу был представлен в виде совокупности его следующих состояний:

1) исходный дисперсный порошок с диаметром частиц меньше 0,25 мм;

2) зародыши гранул с диаметром частиц, лежащим в пределах от 0,25 до 0,5 мм;

3) гранулы с диаметром частиц от 0,5 до 1 мм;

4) гранулы с размерами, находящимися в пределах требований к размерам готового продукта,

но с недостаточной плотностью, влажностью и с диаметром гранул – (1–3) мм;

5) уплотненное состояние порошка в виде устойчивого донного и бортового гарнисажа;

6) гранулы с диаметром больше 3 мм;

7) гранулы необходимой плотности и влажности с диаметром частиц – (1–3) мм.

Так как процесс формирования гарнисажа для рассматриваемой смеси начинается при влагосодержании больше 11 %, а у исходной смеси это значение ниже 8 %, то ее гранулирование можно рассматривать как две последовательные стадии – без образования гарнисажа и с его образованием. Исследование влияния влагосодержания рассматриваемого полидисперсного продукта на скорость образования и роста гранул [2, 3] показало, что эта зависимость носит экспоненциальный характер. Исходя из этого математическая модель процесса гранулирования инстантированных полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором была представлена системами дифференциальных уравнений Колмогорова (1) и (2).

$$\left.\begin{aligned} dP_1/dt &= -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{14}P_1(t);\\ dP_2/dt &= -\lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t);\\ dP_3/dt &= -\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{13}P_1(t);\\ dP_4/dt &= +\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{14}P_1(t);\\ P_1(t) &+ P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} dP_1/dt &= -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{14}P1(t) - \lambda_{15}P_1(t) - \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{61}P_6(t);\\ dP_2/dt &= -\lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{52}P_5(t) + \lambda_{62}P_6(t) + \lambda_{12}P_1(t);\\ dP_3/dt &= -\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{53}P_5(t) + \lambda_{63}P_6(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{13}P(t);\\ dP_4/dt &= -\lambda_{46}P_4(t) - \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{64}P_6(t) + \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{14}P(t);\\ dP_5/dt &= -\lambda_{53}P_5(t) - \lambda_{52}P_5(t) + \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{15}P_1(t);\\ dP_6/dt &= -\lambda_{61}P_6(t) - \lambda_{62}P_6(t) - \lambda_{63}P_6(t) - \lambda_{64}P_6(t) - \lambda_{67}P_6(t) +\\ &\quad \lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{46}P_4(t);\\ dP_7/dt &= -\lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{57}P_5(t);\\ P_1(t) &+ P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P(t)_5 + P_6(t) + P_7(t) = 1 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где $P_1(t) - P_7(t)$ – вероятность нахождения материала в состояниях (1–7) в момент времени t; λ_{ij} – интенсивность перехода материала из i-го состояния в j-е.

В системах дифференциальных уравнений (1) и (2) вероятность нахождения материала в состояниях $P_1(t) - P_7(t)$ рассматривается как отношение его веса в определенном состоянии в текущий момент времени к исходному весу продукта и количеству жидкости, поступившей в гранулятор для увлажнения материала. Интенсивность перехода материала из одного состояния в другое (λ_{ij}) определяется отношением приращения его веса (положительного или отрицательного) в каждом состоянии к промежутку времени, в течение которого оно произошло, а также к текущему весу материала в грануляторе. Она зависит от многих факторов: относительного количества материала, находящегося в одном или смежных состояниях, конструктивных параметров тарельчатого гранулятора и активатора, режима их работы, состава и влажности полидисперсного материала.

На начальной стадии гранулирования полидисперсного материала (до образования гарнисажа) идут процессы образования зародышей гранул и их рост. Интенсивность данных процессов во многом определяется режимом работы активатора, который придает частицам дисперсного материала необходимую скорость и встречно-боковое направление их перемещения относительно основного потока. При этом часть частиц, у которых в точке их столкновения (касания) возникает давление, превышающее 5 МПа, конгломерируется (деформируется и слипается), образуя зародыши гранулы. Для получения данного давления скорость вращения рабочего органа активатора должна быть не меньше определенного «критического» значения, которое определяется кинетической энергией частицы, сошедшей с его лопасти, и в меньшей степени энергией частицы основного потока материала, с которой произошло столкновение. В соответствии с предложенной гипотезой механизма процесса интенсивность перехода исходной смеси в зародыши (λ_{12}) будет зависеть от следующих факторов:

- концентрации исходной смеси в гранулируемом материале;
- конструкции рабочего органа активатора (форма, количество, расположение и размеры лопастей);
- скорости вращения рабочего органа активатора (она должна лежать в диапазоне, влияющем на интенсивность образования зародышей);
- активной площади лопастей активатора, которая формирует высокоскоростной поток частиц исходной смеси (она уменьшается пропорционально снижению концентрации данной смеси в тарели гранулятора и увеличению скорости его вращения);
- влагосодержания гранулируемого полидисперсного продукта, зависящего от расхода влаги, поступающей в форсунку гранулятора для увлажнения сыпучего материала и его исходного влагосодержания (второй путь формирования зародышей на первом этапе гранулирования – слипание частиц с высоким влагосодержанием).

В соответствии с указанными факторами интенсивность формирования зародышей из частиц исходной смеси будет определяться выражением (3).

$$\lambda_{12} = K_{12}P_1[K_{v2}\Delta V/V_m + K_{m2}SP_1/(0{,}001n) + K_w\exp(W/2{,}1)] \quad (3)$$

$$W = W_m + \mu(F\Delta t/G)100\%, \quad (4)$$

где $\Delta V = 3{,}14dn - V_m$; d – диаметр окружности, описываемый лопастями активатора при его вращении; n – скорость вращения лопастей активатора; V_m – минимальная усредненная линейная скорость удара частицы о лопасть активатора, при которой начинается процесс

образования зародышей; S – геометрическая площадь лопастей активатора; W_m – влагосодержание исходного дисперсного материала; G – текущий вес гранулируемого продукта; F – массовый расход влаги, поступающей в форсунку гранулятора; Δt – длительность промежутка времени, в течение которого осуществляется распыление влаги над гранулируемым материалом; μ – коэффициент, учитывающий долю влаги, попавшей на полидисперсную смесь, от количества влаги, поступившей в форсунку гранулятора (определяется экспериментально); $K_{v\,2}, K_{P_2}, K_W$ – весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого слагаемого выражения (3) в интенсивность перехода исходной смеси в зародыши (определяются экспериментально).

Для обеспечения эффективного процесса окатывания дисперсного материала в тарельчатых грануляторах необходимо соблюдение режима переката гранул и свободное расположение зон гранулообразования [2]. Данный режим обеспечивается определенным коэффициентом заполнения тарели и конструктивно-режимными параметрами гранулятора (углом наклона, скоростью вращения, диаметром и высотой борта тарели). Экспериментально установлено, что для исследуемого материала коэффициент заполнения ограничен величиной удельной нагрузки (0,2 т/м^3) на тарель. Для определенного вида окатываемого материала и коэффициента заполнения тарели между конструктивно-режимными параметрами существует аналитическая зависимость (5), которая получена из условия отрыва гранул в верхней точке тарели гранулятора [2].

$$\frac{f}{r_{cp}} = tg\alpha - \frac{D\omega^2}{4q\cos\alpha}, \qquad (5)$$

где D – диаметр тарели; ω – угловая скорость вращения тарели; α – угол наклона тарели; f – коэффициент трения качения; r_{cp} – средний размер формирующихся гранул; q – ускорение свободного падения.

Для определения высоты борта тарели (H) рекомендуется использовать выражение $H = 0{,}15D$.

Из выражения (5) следует, что если изменить один из конструктивно-режимных параметров тарельчатого гранулятора, то для обеспечения режима переката в тарели необходимо изменять другие параметры. Исходя из этого в уравнение, связывающее интенсивность перехода исходной смеси в гранулы в состояниях 3, 4, 6, достаточно включить один конструктивно-режимный параметр (D).

В результате анализа априорной информации [1, 3] и экспериментального исследования рассматриваемого процесса принимаем, что интенсивность перехода исходной смеси в гранулы зависит от следующих факторов:

- концентрации исходной смеси и гранул соответствующего размера в гранулируемом материале;
- текущего влагосодержания материала;
- показателя комкуемости материала, величина которого зависит от гидрофильности, гранулометрического состава, наличия в нем коллоидных фракций и влажности;
- конструктивно-режимных параметров активатора и тарельчатого гранулятора.

Уравнение, связывающее интенсивность перехода исходной смеси в гранулы размером 3, 4, 6, будет иметь следующий вид (6):

$$\lambda_{1j} = K_{1j}P_1P_j[K_{v\,j}\Delta V/V_m + K_{pj}SP_1/(0{,}001n) + K_w\exp(W/2{,}1) + K_k\Delta K/K_m + K_{tj}\Delta D/D_m],\ j = 3{,}4{,}6; \qquad (6)$$

где K_m – минимальный коэффициент комкуемости исходной дисперсной смеси, при котором возможно гранулирование рассматриваемого полидисперсного материала; D_m – минимальный диаметр тарели гранулятора, который определяет нижний предел диапазона его изменения при поиске оптимальных значений (задается исследователем); K_k , $K_{t\,j}$ – весовые коэффициенты, определяющие вклад соответствующих слагаемых в интенсивность перехода исходной смеси в гранулы; ΔK – приращение коэффициента комкуемости; ΔD – увеличение диаметра тарели по сравнению с его минимальным значением.

Переход гранулируемого продукта из состояния 2 в состояние 3 и далее в 4 происходит путем налипания на них дисперсных частиц в процессе их переката в тарели гранулятора, а также при их столкновении с частицами высокоскоростного потока. Интенсивность перехода зависит от концентрации в полидисперсном продукте частиц исходного материала, зародышей и гранул в состоянии 3. Также на интенсивность данных переходов будут оказывать влияние влагосодержание и комкуемость смеси, конструктивно-режимные параметры тарели и активатора. Исходя из этого зависимость интенсивности перехода материала из одного состояния в другое от указанных факторов будет иметь следующий вид (7):

$$\lambda_{ij} = K_{ij}P_1P_{j-1}[K_{vj}\Delta V/V_m + K_{pj}SP_1/(0{,}001n) + K_w\exp(W/2{,}1) + K_k\Delta K/K_m + + K_{tj}\Delta D/D_m],\ ij = 23{,}34. \qquad (7)$$

Результаты экспериментального исследования процесса гранулирования полидисперсных продуктов показывают, что исходная смесь, зародыши гранул находятся на донной части тарели и налипают на перекатывающиеся по ним крупные гранулы. Высокоскоростной поток исходной смеси и зародышей, создаваемый активатором, практически на крупные гранулы не попадает. Исходя из этого интенсивность перехода гранул из состояний 4, 7 в состояние 6 будет зависеть только от влажности продукта, его комкуемости и конструктивно-режимных параметров тарели (8).

$$\lambda_{ij} = K_{ij} P_1 P_i \ [K_w \exp(W/2{,}1) + K_k \Delta K / K_m + + K_{ij} \Delta D / D_m], ij = 46;76; \quad (8)$$

Конструктивно активатор устанавливается в зоне тарели гранулятора, где в верхнем слое перекатываются в основном крупные гранулы. Попадая в воронку, создаваемую вращающимся активатором, они разбиваются им на более мелкие их зародыши и частицы, по размеру соответствующие исходной смеси. Интенсивность перехода комкуемой смеси из состояния 6 в состояния 1, 2, 3, 4, 7 зависит от количества крупных гранул, режима работы активатора и будет определяться по выражению (9).

$$\lambda_{ij} = K_{ij} P_6 (K_{nj} \Delta n / n_m + K_{sj} S_a), ij = 61{,}62{,}63{,}64{,}67; \quad (9)$$

где $\Delta n = n - n_m$; n_m – минимальная скорость вращения лопастей активатора; S_a – активная площадь лопастей активатора, которая разбивает крупные гранулы; K_{nj}, K_{sj} – коэффициенты, учитывающие вклад соответствующего слагаемого выражения (9) в интенсивность перехода.

Ниже донного подрезного ножа, по ходу движения комкуемого материала, над тарелью установлены форсунки для подачи влаги, которая, попадая на исходную смесь и зародыши гранул, способствует их налипанию на днище и борт тарели, формируя гарнисаж. Количество дисперсного материала и зародышей гранул, переходящих в гарнисаж, зависит от их концентрации в смеси, текущего влагосодержания и комкуемости материала, конструктивно-режимных параметров гранулятора и определяется по выражению (10).

$$\lambda_{ij} = K_{ij} P_i [K_w \exp(W/2{,}1) + K_k \Delta K / K_m + + K_{ij} \Delta D / D_m], ij = 15{,}25; \quad (10)$$

Когда толщина гарнисажа становится больше величины зазора между дном (бортом) тарели и подрезными ножами, верхняя часть его срезается ими, превращаясь в зародыши и мелкие гранулы. При этом интенсивность перехода гарнисажа в данные состояния будет зависеть от диаметра и высоты борта тарели гранулятора, скорости ее вращения, количества гарнисажа в ней. При выводе уравнения связи между интенсивностью перехода гарнисажа в зародыши (мелкие гранулы) и указанными факторами было принято три допущения:

- процесс перехода материала из состояния гарнисажа в зародыши начинается после того, как толщина гарнисажа становится больше расстояния между ножами и дном (бортом) тарели;
- гарнисаж перед подрезными ножами равномерно распределен по радиусу и борту тарели;
- высота налипания гарнисажа на борт тарели прямо пропорциональна коэффициенту ее заполнения.

В соответствии с предложенной гипотезой механизма образования зародышей и мелких гранул из гарнисажа и принятыми допущениями математическая модель данного процесса может быть представлена выражениями (11) и (12).

$$\left.\begin{array}{l} \lambda_{ij} = 0, npuG_d \le 0, ij = 52{,}53, \\ \lambda_{ij} = K_{ij}[P_G - K_G (D + 0{,}15 k_z D)/D_m)^2 / G] * [1{,}1(D - D_m) + \\ 0{,}026(N - N_m)(D + 0{,}15 k_z D)^2], npuG_d \rangle 0,, \end{array}\right\} \quad (11)$$

$$G_d = P_G - K_G (D + 0{,}15 k_z D)/D_m)^2 / G; \quad (12)$$

где G_d – количество полидисперсного материала, остающегося на дне и борту тарели в виде гарнисажа после окончания процесса гранулирования, выраженное через вероятность его данного состояния; N, N_m – текущая и минимальная скорости вращения тарели гранулятора; K_G – коэффициент, зависящий от расстояния между ножами и поверхностью дна (борта) тарели; P_G – вероятность нахождения материала в состоянии гарнисажа; k_z – коэффициент заполнения тарели.

Стадия уплотнения гранул налагается как на стадию образования устойчивого зародыша, так и на стадию его роста и самостоятельно проявляется лишь на заключительном этапе гранулирования. Более плотные и прочные агрегаты способствуют ускорению и стабилизации процессов образования зародышей и росту гранул. Исследования по кинетике упрочнения гранул в процессе окатывания показывают, что она зависит в основном от влажности и свойств комкуемого материала, размера гранул и незначительно зависит от конструктивно-режимных параметров гранулятора, если в нем обеспечивается режим переката. Учитывая, что прочность структуры гранулы неоднородна и к периферии уменьшается, изменяя угловую скорость вращения активатора (т.е. силу удара лопасти по грануле), можно регулировать ее геометрические размеры и плотность. Исходя из этого интенсивность уплотнения гранул (переход из состояния 4 в состояние 7) будет определяться по выражению (13).

$$\lambda_{47} = K_{47} P_4 [K_W \exp(W/2{,}1) + K_k \Delta K / K_{\min} + K_{nj} \Delta n / n_m] \quad (13)$$

Для параметрической идентификации описанной модели был сформирован массив экспериментальных данных по результатам исследования динамики процесса гранулирования полидисперсных материалов. Данный массив включает в себя вероятности нахождения материала в его выделенных состояниях в определенные моменты времени. Интервал времени, через который определялась концентрация гранулируемого продукта в этих состояниях, составлял в среднем одну минуту.

Как известно, процедура параметрической идентификации математической модели технологического объекта представляет собой поиск таких значений параметров (коэффициентов) модели, которые обеспечивают наилучшую близость переменных объекта и модели при одних и тех же исходных данных. В качестве критерия

близости результатов модели и объекта было взято выражение (14).

$$K_R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\alpha_j (P_{ij}^{э} - P_{ij}^{м})^2}}{nm}, \qquad (14)$$

где $P_{ij}^{э}, P_{ij}^{м}$ – соответственно экспериментальное и модельное значения вероятности i-го состояния продукта при j-м эксперименте; α_j – весовой коэффициент, определяющий значимость j-го экспериментального значения вероятности продукта (задается экспертами); n – число состояний гранулируемого продукта (при решении первой системы дифференциальных уравнений – 4, при второй – 7); m – количество точек в массиве экспериментальных данных.

Процедура параметрической идентификации процесса гранулирования полидисперсных продуктов была разбита на ряд этапов. Во-первых, в уравнениях, связывающих интенсивности переходов гранулируемого продукта с факторами, влияющими на процесс, были выделены коэффициенты (K_{ij}), значения которых будут находиться в процессе параметрической идентификации модели. Были определены и заданы остальные константы, входящие в данные уравнения. На втором этапе с использованием массива экспериментальных данных динамики процесса гранулирования полидисперсных материалов осуществлялся поиск оптимальных значений коэффициентов (K_{ij}).

В соответствии с разработанным алгоритмом процедура поиска коэффициентов (K_{ij}) осуществляется в такой последовательности:

- определяется текущее влагосодержание материала по выражению (4) и проверяется выполнение условия $W \geq 11\%$;
- если условие не выполняется, расчет интенсивности перехода системы из одних состояний в другие осуществляется по выражениям (3), (6), (7) и решается система дифференциальных уравнений (1);
- если условие выполняется, расчет интенсивности перехода системы из одних состояний в другие осуществляется по выражениям (3–13) и решается система дифференциальных уравнений (2);
- определяется разность между j-ми вычисленными вероятностями состояний и соответствующими им экспериментальными значениями по выражению (15):

$$\Delta P_{ij} = P_{ij}^{э} - P_{ij}^{м}, \; i = 1, 2, \ldots, n; \qquad (15)$$

- по рекуррентным выражениям (16) и (17) вычисляется сумма расхождений модельных и экспериментальных вероятностей состояний продукта и сумма квадратов этих расхождений на текущий момент времени:

$$P_{ij}^{c} = P_{ij-1}^{c} + \alpha_j \Delta P_{ij}, i = 1,2,\ldots 7; \qquad (16)$$

$$P_{ij}^{k} = P_{ij-1}^{k} + \alpha_j \Delta P_{ij}^2, i = 1,2,\ldots 7. \qquad (17)$$

Описанная последовательность операций повторяется для всех экспериментальных значений веро-

ятностей состояний продукта, содержащихся в массиве данных. Затем вычисляется значение критерия по выражению (14) и определяется расхождение между его величинами, полученными после текущего и предыдущего цикла вычислений (после первого цикла предыдущее значение критерия близости задается экспертом).

Если это расхождение оказывается больше заданной величины, по выражениям (18) и (19) определяются новые значения коэффициентов (K_{ij}) и вся процедура их поиска повторяется.

$$K_{ij} = K_{ij}^{*} + \beta_{ij} P_{im}^{c} P_{im}^{k}; \qquad (18)$$

$$K_{ij} = K_{ij}^{*} + \beta_{ij} (P_{im}^{c} + P_{jm}^{c})(P_{im}^{k} + P_{jm}^{k}), \qquad (19)$$

где K_{ij}^{*} – значение искомых коэффициентов, на предыдущем цикле вычислений; β_{ij} – коэффициенты, связывающие величину изменения искомых коэффициентов с суммами и квадратами расхождений вероятностей состояний (задаются экспертами).

В выражениях (18) и (19) индекс (i) означает состояние гранулируемого продукта, из которого материал переходит в (j) состояние. Выражение (18) используется в уравнениях, где интенсивность перехода продукта зависит от вероятности одного его состояния (i), а выражение (19) – от двух его состояний (i , j).

Процесс поиска оптимальных значений коэффициентов (K_{ij}) можно интерпретировать как модификацию метода градиентов, в котором знак суммы расхождений вероятностей состояний продукта показывает направление изменения коэффициентов, а квадрат расхождений вероятностей влияет на величину шага их изменения. Решение системы дифференциальных уравнений выполнялось с помощью метода Рунге-Кутта. Программная реализация алгоритма осуществлялась в среде Delphi.

Предложенная нами модель динамики процесса гранулирования инстантированных полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором позволяет исследовать процесс в достаточно широком диапазоне изменения его конструктивно-режимных параметров для определенных структурно-механических свойств комкуемого материала. Данная модель может быть использована для поиска оптимальных значений указанных параметров.

Список литературы

1. Попов А.М., Попов А.А., Тихонов В.В., Гурин В.В. Тарельчатый гранулятор с активатором. Патент на изобретение № 2209662 от 10.09.2003 г., по заявке № 2001123756/12(025316) от 27.08.2001.

2. Попов, А.М. Анализ и синтез технологий гранулированных концентратов напитков. – Кемерово: КемТИПП, 2003. – 245 с.

3. Лотов, В.А. Основы управления процессами структурообразования во влажных дисперсных системах / В.А. Лотов, В.В. Гурин, А.М. Попов. – Кемерово; М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2006. – 295 с.

4. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 499 с.

5. Marshale Wayne E., Ahmedne Mohamed, Rao Ramu M., Johns Mitchelle M. Granular activated carbons from sugarcane bagasse: production and uses // Int. Sugar J. – 2000. – 102, № 1215. – С. 147–151.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности».
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-41-20
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

A.M. Popov, M.A. Makkoveev, E.B. Astahenko, A.V. Chupin

Identification of granulation process of instantized polydispersed products in plate granulators with activator

The hypothesis of granulation process of instantized polydispersed products in plate granulators with an activator, reflecting the stochastic nature of the process has been offered. According to it the mathematical model has been developed. It includes two systems of linear differential equations of Kolmogorov and a set of equations connecting the intensity of material transformation with the granulator parametres and material properties. Taking into account the model features and the results of the experimental research the procedure of parametrical identification of the model has been developed.

Identification, instantized polydispersed product, activator, mathematical model, plate granulator.

Kemerovo Institute of the Food Science and Technology
47, Boulevard Stroitely, Kemerovo, 650056, Russia
Phone: +7(3842) 73-41-20
e-mail: office@kemtipp.ru