

Математическая модель процесса гранулообразования дисперсных смесей на основе молочной сыворотки в аппаратах тарельчатого типа



А. Л. Майтаков

Дата поступления в редакцию: 08.04.2020

Дата принятия в печать: 24.07.2020

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

e-mail: may585417@mail.ru



© А. Л. Майтаков, 2020

Аннотация.

Введение. Производство порошковых смесей в России, полученных из концентрированных соков (овощных, ягодных, фруктовых), сухой молочной сыворотки, сухого молока, различных ароматизаторов и др., затруднено из-за отсутствия эффективных технологий изготовления. Таким образом, важной задачей является создание технологического потока, в котором одновременное применение увлажняющих добавок и структурированных капиллярно-пористых гранул позволило бы скомбинировать полидисперсную систему с большой степенью надежности инстантирования. Целью работы является создание математической модели процесса гранулообразования дисперсных смесей для научного обоснования основ технологий получения быстрорастворимых многокомпонентных полидисперсных гранулированных напитков.

Объекты и методы исследования. В ходе проведения экспериментов применялся тарельчатый гранулятор с активатором. Исследовалась полидисперсная смесь на основе молочной сыворотки. Фракционный состав исследуемой смеси: шрот клюквы (20 %), молочная сыворотка (40 %), картофельный крахмал (5 %), сахарная пудра (20 %), премиксы (5 %) и др.

Результаты и их обсуждение. На основании предварительно полученных данных, а также данных, установленных экспериментальным путем, были получены сведения о влиянии режимов гранулирования, режимов работы гранулятора и фазового состава исходной смеси на характеристики полученного гранулированного продукта. Проверка результатов, полученных на основании расчетов математической модели процесса гранулирования с результатами экспериментальных исследований, показала, что постулированная модель с достаточной точностью отражает физическую сущность процесса гранулирования полидисперсных смесей на основе местного сырья и молочной сыворотки.

Выводы. Созданы методы и способы регулирования процесса гранулообразования полидисперсных смесей на основе молочной сыворотки в грануляторах тарельчатого типа. Разработана математическая модель процесса, сформированная на основании гипотезы о стохастическом характере протекающих процессов. Процесс гранулирования был описан как сочетание семи состояний в зависимости от гранулометрического состава и определенного времени гранулирования.

Ключевые слова. Полидисперсная смесь, молочная сыворотка, гранула, гранулирование, математическая модель

Финансирование. Исследования были выполнены на базе ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (КемГУ).

Для цитирования: Майтаков, А. Л. Математическая модель процесса гранулообразования дисперсных смесей на основе молочной сыворотки в аппаратах тарельчатого типа / А. Л. Майтаков // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 3. – С. 383–392. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-383-392>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Mathematical Model of Whey-Based Granulation Dispersed Mixtures Process in Disk-Type Devices

Anatolij L. Maytakov

Received: April 08, 2020

Accepted: July 24, 2020

Kemerovo State University,
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia

e-mail: may585417@mail.ru



© A.L. Maytakov, 2020

Abstract.

Introduction. In Russia, production of juice, whey, milk, and flavor powders is complicated by the lack of effective manufacturing

technologies. Thus, a new technological flow for simultaneous use of moisturizing additives and structured capillary-porous granules remains an urgent task as it would allow combining a polydisperse system with instantiation reliability. The research objective was to create a mathematical model of the process of granulation of dispersed mixtures, as well as scientific substantiation for the new technology of instant polydisperse granular beverage mixes

Study objects and methods. The research featured a disk-type granulator with an activator and a polydisperse whey-based mix. The fractional composition of the mix included cranberry pulp (20%), whey (40%), potato starch (5%), powdered sugar (20%), premixes (5%), etc.

Results and discussion. The research revealed the effect of granulation modes, granulator operation modes, and the phase composition of the initial mix on the profile of the resulting granulated product. The mathematically obtained results were proved experimentally: the model accurately reflected the physical essence of the granulation process of the polydisperse mixes based on local raw materials and whey.

Conclusion. The study provided methods for regulating the process of granulation of polydisperse whey-based mixes in disk-type granulators. The article introduces a mathematical model of the process based on the hypothesis of the stochastic nature of the processes. The granulation process was described as a combination of seven states depending on the granular composition and granulation time.

Keywords. Polydispersity mixture, milk whey, granule, granulation, mathematical model

Funding. The research was performed on the premises of the Kemerovo State University (KemSU).

For citation: Maytakov AL. Mathematical Model of Whey-Based Granulation Dispersed Mixtures Process in Disk-Type Devices. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(3):383–392. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-383-392>.

Введение

Среди большого разнообразия соков и напитков, производимых из них, особое место занимают специализированные продукты в виде смесей. Концентраты в виде порошков, а также напитки, полученные из таких концентратов, представляют как научный, так и практический интерес [1]. Плюсами можно назвать большие сроки хранения без потери пищевой ценности, удобство транспортировки, улучшенную структуру ассортимента, повышенную биологическую ценность напитков, возможность разработки специфических рецептов для различных групп населения, в том числе отдаленных районов и в экстремальных условиях [2–8].

Производство порошковых смесей в России, полученных из концентрированных соков (овощных, ягодных, фруктовых), сухой молочной сыворотки, сухого молока, различных ароматизаторов и др., затруднено из-за отсутствия эффективных технологий изготовления таких продуктов, а также современных производительных и эффективных аппаратов для осуществления технологических процессов. «Узким местом» таких технологий является производство сухих смесей в виде гранул. Существует три метода получения гранулированных напитков: применение концентратов сока для нанесения на увлажненный носитель (например, сахар), распылительная сушка и метод экструзии [8–10].

Механизм получения быстрорастворимых продуктов предполагает, что он зависит не только от материала отдельных частиц, но и от связей между частицами, составляющими гранулу, их размера, пористости, размера, объема и удельной поверхности пор, гранулометрического состава частиц, ее гигроскопичности [11–16].

Таким образом, важной задачей является создание технологического потока, в котором

одновременное применение увлажняющих добавок и структурированных капиллярно-пористых гранул позволило бы скомбинировать полидисперсную систему с большой степенью надежности инстантирования.

Целью работы является разработка математической модели процесса гранулообразования дисперсных смесей для научного обоснования основ технологий получения быстрорастворимых многокомпонентных полидисперсных гранулированных напитков

Объекты и методы исследования

Фракционный состав исходной смеси для проведения исследований состоял из шрота клюквы (20 %), молочной сыворотки (40 %), картофельного крахмала (5 %), сахарной пудры (20 %), премиксов (5 %) и др.

В ходе проведения экспериментов применялся тарельчатый гранулятор с активатором со следующими основными параметрами: угловая скорость (частота вращения) тарели диаметром 800 мм – 45–50 1/мин; частота вращения активатора с диаметром лопастей 60 мм – 2200 об/мин., расход влаги, поступающей в форсунку при осуществлении гранулирования, – 0,12 кг/мин. Распыление производилось через форсунку. Временной интервал $\Delta t_w = 1$ мин.

Исследовалась полидисперсная смесь на основе молочной сыворотки (вес 30 кг) с влажностью (W_m) 8 % и коэффициентом комкуемости (K) 0,7. Промежутки времени для определения гранулометрического состава смеси – 1 мин.

При определении гранулометрического состава использовались стандартные сита с диаметрами отверстий 250, 500, 1000 и 3000 мкм.

Взвешивание остатков на ситах производилось на аналитических весах с точностью до 0,05 г.

Результаты и их обсуждение

Процесс грануляции полидисперсных быстрорастворимых смесей определяется «предрасположенностью» к окомкованию гранулируемого материала. Эта способность характеризуется коэффициентом комкуемости K . Основными факторами, оказывающими влияние на величину коэффициента комкуемости, являются гидрофильность смеси, ее гранулометрический состав, коллоидные фракции в его составе, влажность [13, 17].

Коэффициент комкуемости полидисперсного материала $K = W_{\text{нкв}} / (W_{\text{мкв}} - W_{\text{нкв}})$ определяется в зависимости от $W_{\text{нкв}}$ – наименьшей капиллярной влагоемкости и $W_{\text{мкв}}$ – максимальной капиллярной влагоемкости [11].

Стабильная работа грануляторов тарельчатого типа отмечена при показателе коэффициента K в пределах от 0,6 до 0,8. Следует отметить, что гранулирование в грануляторах эффективно только в том случае, если осуществляется режим переката.

Одним из важнейших показателей, который определяет траекторию движения гранулируемой (комкуемой) смеси, является коэффициент заполнения рабочего объема тарели гранулятора. Коэффициент заполнения в значительной степени влияет на стабильность процесса гранулирования, а также его эффективность. Одним из показателей эффективности гранулятора является его производительность, которая возрастает при заполняемости тарели до обеспечения давления смеси до 0,2 т/м². Однако дальнейшее увеличение данного коэффициента ведет к снижению производительности гранулятора, т. к. при большем заполнении снижается подвижность гранулируемой смеси по тарели, ухудшается разделение гранул по фракциям и др.

При проведении исследований было отмечено, что на тарели гранулятора существуют определенные зоны, в которых гранулы движутся по траекториям, характерным только для этой зоны. В каждой зоне происходят изменения гранулируемой системы, характерные именно этой зоне. Эти изменения определяются режимами работы гранулятора (скорость вращения тарели, угол ее наклона и др.).

Особое место при гранулообразовании играет гарнисаж – защитный слой, образующийся на боковых стенках и дне тарели гранулятора. Гарнисаж образуется при влажности комкуемой смеси 11–12 %. Донный и боковой гарнисаж образуются из исходной смеси, а также мелких зародышей гранул, впредельных в гарнисаж под действием более крупных гранул. Относительная скорость исходных частиц, находящихся в зоне непосредственной близости с гарнисажем, практически равна нулю. Они лишь перекачиваются через уже образовавшиеся

гранулы. В конструкции гранулятора предусмотрены бортовые и донные ножи, которые срезают избыточный гарнисаж при вращении тарели. Срезанные ножами частицы гарнисажа становятся зародышами новых гранул.

Одновременно с образованием устойчивых зародышей гранул и их роста происходит уплотнение гранул, что является заключительной стадией гранулирования. Уплотнение, а следовательно, и упрочнение образовавшихся гранул ускоряют и стабилизируют процесс возникновения зародышей и их рост. При постоянной влажности гранулируемой смеси прочность образовавшихся гранул зависит от их размера, а также свойств самой полидисперсной смеси.

Регулировать геометрические размеры и плотность гранулы, учитывая неоднородность структуры, можно путем варьирования силы удара лопасти по грануле, что достигается изменением числа оборотов активатора. Таким образом можно стабилизировать и весь процесс гранулообразования. При ударе лопасти активатора по грануле отколовшиеся мелкие частицы гранул смещаются к центру тарели, где начинают агрегатироваться с уже имеющимися в центре частицами. Производительность гранулятора при этом возрастает.

Для построения математической модели гранулирования полидисперсных смесей на основе молочной сыворотки механизм образования гранул был представлен в виде «марковского» процесса – процесса «рождения» и «гибели» частиц. Для представления данной модели были использованы системы дифференциальных уравнений Колмогорова [18]. Чтобы использовать этот подход для математического описания процесса грануляции полидисперсной смеси, было принято, что смесь в процессе гранулирования находится следующих семи состояниях:

- 1 – исходная полидисперсная смесь; диаметр частиц менее 250 мкм;
- 2 – зародыши гранул; диаметр частиц 250–500 мкм;
- 3 – гранулы; диаметр 500–1000 мкм;
- 4 – гранулы с диаметром 1000–3000 мкм; гранулы данного типа по размерам соответствуют предъявляемым требованиям с точки зрения готового продукта, но имеют недостаточную плотность и влажность;
- 5 – уплотненное состояние гранул (донный и боковой гарнисаж);
- 6 – гранулы, имеющие размеры больше 3000 мкм;
- 7 – гранулы, имеющие размеры от 1000 до 3000 мкм; имеют необходимые плотность и влажность.

Пребывание в семи состояниях свойственно исследуемой смеси на основе молочной сыворотки

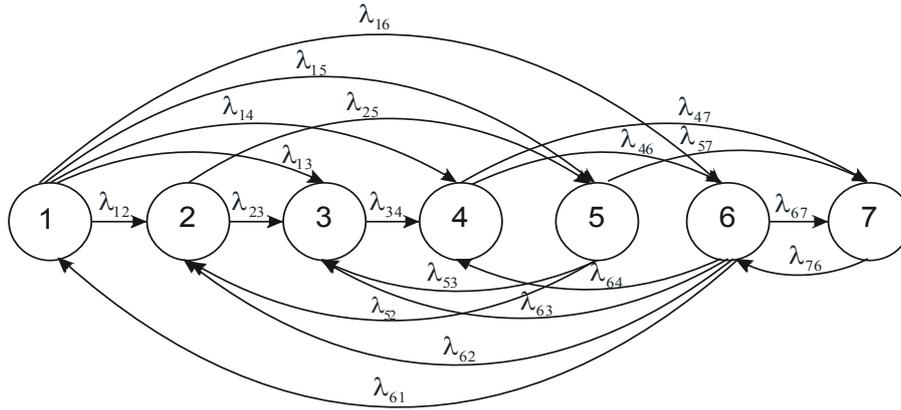


Рисунок 1. Граф состояний быстрорастворимой полидисперсной смеси в грануляторе тарельчатого типа с активатором

Figure 1. State graph of instant polydisperse mix in a disk-type granulator with an activator

и имеющей в своем составе клюквенный шрот, сахарную пудру, крахмал и другие компоненты.

На основании описания кинетики процесса гранулирования, приведенного выше, был разработан граф состояний быстрорастворимой полидисперсной смеси в грануляторе тарельчатого типа с активатором (рис. 1).

Процесс гранулирования последовательно проходит две фазы. Во время первой гарнисаж не

образуется. Во время второй процесс протекает с образованием гарнисажа. Причина в том, что формирование гарнисажа начинается при содержании влаги в смеси более 11 %, в то время как исходная смесь имеет влажность менее 8 %.

В основу математической модели процесса гранулирования полидисперсной смеси на основе молочной сыворотки была положена система дифференциальных уравнений Колмогорова [18].

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

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

где $P_1(t)–P_7(t)$ – вероятность нахождения полидисперсного материала в состояниях, указанных выше (определяется как отношение веса продукта в i -ом состоянии к суммарному весу продукта во всех выделенных состояниях);

$\lambda_{12}–\lambda_{67}$ – интенсивности перехода материала из одного состояния в другое (первая цифра индекса указывает состояние, из которого материал переходит в новое состояние, указанное второй цифрой индекса).

Предлагаемая математическая модель содержит уравнения корреляции переходных процессов исходной смеси из одного состояния в другое с учетом ее фазового состава и влажности. В данной модели может быть учтена способность смеси к агрегатированию, а также режимы работы и конструктивные параметры гранулятора.

Определим интенсивность перехода исходной смеси из одного состояния в другое как соотношение между приращением массы смеси (положительным

или отрицательным) в любом состоянии и временным интервалом, в котором произошло это приращение, с учетом массы смеси на тарели гранулятора.

Значительное влияние на интенсивность переходов оказывают масса смеси, которая может находиться в одном или нескольких состояниях, ее влажность, способность к агрегатированию, а также технологические режимы и особенности конструкции тарельчатого гранулятора с активатором.

Отношение массы смеси в каждом состоянии в определенное время к исходной ее массе (принимая во внимание количество жидкости, поступающей в гранулятор для ее увлажнения) будет определять вероятность пребывания полидисперсной смеси в одном из семи состояний.

Таким образом, в соответствии с предложенным механизмом образования гранул из полидисперсной смеси, основными факторами, оказывающими влияние на интенсивность преобразования исходного материала в зародыши гранул (λ_{12}), являются:

– концентрация сыворотки, которая обладает наибольшими адгезионными свойствами в гранулируемом материале;

– конструктивные параметры активатора (форма и количество лопастей, площадь лопастей, принимающая непосредственное участие в процессе); частота его вращения; угловая скорость активатора, формируя поток комкуемых частиц исходной смеси, должна обеспечить максимальную интенсивность образования зародышей;

– количество поступающей через форсунки влаги, подаваемой в гранулятор для увлажнения гранулируемой полидисперсной смеси на второй стадии процесса зародышеобразования; на первой стадии процесса происходит слипание частиц исходной смеси с высоким содержанием «собственной» влаги;

– конструктивные размеры гранулятора и его тарели, т. к. с увеличением ее диаметра положительный результат от воздействия вращающегося активатора на зародыши гранул уменьшается;

– диаметр тарели гранулятора: увеличение его диаметра значительно снижает эффект воздействия на смесь вращающегося активатора.

Таким образом, принимая во внимание сказанное выше, можно определить интенсивность зародышеобразования, руководствуясь формулами (3)–(4)

$$\lambda_{12} = K_{12}P_1[K_{v2} \Delta V/V_m + K_{p2}SP_1/(0,001n) + K_w \exp(W/2,1) + K_{f1}/D] \quad (3)$$

$$\lambda_{1j} = K_{1j}P_1P_j[K_{vj} \Delta V/V_m + K_{pj}SP_1/(0,001n) + K_w \exp(W/2,1) + K_k/(1-K)^{4,5} + K_{fj}/(0,1 + \Delta D/D_m)], \quad (5)$$

$j = 3, 4, 6;$

где K – коэффициент комкуемости исходной дисперсной смеси;

$$\Delta V = 3,14dn - V_m \quad (4)$$

где V_m – минимальная линейная скорость частицы, сходящей с лопасти активатора, при которой начинается процесс образования зародышей, м/сек;

S – текущая геометрическая площадь лопастей активатора, м²;

D – диаметр тарели, м;

$K_{v2}(1/сек)$, $K_{p2}(об/м^2 * сек^2)$, $K_w(1/ % * сек)$, $K_{f1}(м/сек)$ – весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого слагаемого выражения (4.11) в интенсивность перехода исходной смеси в зародыши (определяются экспериментально).

Экспериментально установлено, что интенсивность трансформации полидисперсной смеси в гранулы в значительной степени зависит от содержания влаги в исходной смеси. Также влияние на интенсивность оказывает концентрация сыворотки в полидисперсной смеси, содержание уже имеющихся гранул соответствующей фракции, наличие в исходной смеси коллоидных фракций, а также режимы работы и конструктивные параметры гранулятора.

Для того чтобы обеспечить режим перекачивания, активатор должен размещаться в зоне нахождения крупных агрегатированных частиц и гранул. При таком расположении верхняя часть активатора разрушает крупные гранулы, а нижняя – «содействует» процессу образования зародышей.

Принимая во внимание свойства исходной полидисперсной смеси на основе молочной сыворотки, были определены конструктивные параметры тарельчатого гранулятора с активатором, обеспечивающие режим переката комкуемого материала и сегрегации образовавшихся гранул. Для выполнения данных условий соотношение диаметра лопастей активатора и диаметра тарели гранулятора должно находиться в пределах от 1:12 до 1:18. Активатор должен быть установлен в 5–10 мм от дна и борта.

На каждую из частиц, находящихся на тарели, действуют центробежные силы (из-за вращения тарели), силы гравитации (в связи с наклоном тарели) и силы трения смеси о поверхность вращающейся тарели. Одновременно происходит увлажнение смеси через форсунки гранулятора. В результате зародыши гранул, двигаясь по сложной траектории, агрегируются и наращиваются. Крупные гранулы попадают в зону активатора, разрушающего их.

В соответствии с указанными факторами интенсивность перехода исходной смеси в состояния 3, 4, 6 будет определяться по выражению (5)

D_m – минимальный диаметр тарели гранулятора, который определяет нижний предел диапазона

его изменения при поиске оптимальных значений (задается исследователем), м;

ΔD – приращение диаметра тарели, по сравнению с его минимальным значением, которое будет использоваться при исследовании процесса, м.;

$K_{ij}(1/сек)$, $K_k(1/сек)$ – весовые коэффициенты, определяющие вклад соответствующих слагаемых в интенсивность перехода исходной смеси на гранулы.

При налипании на зародыши гранул мелких

$$\lambda_{ij} = K_{ij}P_{j-1} [K_{vj}\Delta V/V_m + K_{pj}SP_1/(0,001n) + K_w \exp(W/2,1) + K_k/(1-K)^{4,5} + K_{ij}(0,1 + \Delta D/D_m)], \quad (6)$$

$$ij = 23,34;$$

Для вычисления интенсивности перехода гранул из состояний 4 и 7 в состояние 6, необходимо использовать выражения (7) и (8).

$$\lambda_{46} = K_{46}P_4 [K_w \exp(W/2,1) + K_k(1-K)^{4,5} + K_{t6}(0,1 + \Delta D/D_m)] \quad (7)$$

$$\lambda_{76} = K_{76}P_7 [K_w \exp(W/2,1) + K_k(1-K)^{4,5} + K_{t6}(0,1 + \Delta D/D_m)] \quad (8)$$

Интенсивность перехода гранулируемого материала из состояния крупных гранул (состояние 6, рис. 1) в состояния, предшествующие и последующие (состояния 1, 2, 3, 4, 7), зависит от количества крупных гранул и особенно от частоты вращения активатора и его активной поверхности. Она определяется из выражения:

$$\lambda_{ij} = K_{ij}P_6 (K_n \Delta n / n_m + K_s S), ij = 61,62,63,64,67. \quad (9)$$

где $\Delta n = n - n_m$; n_m – минимальная скорость вращения лопастей активатора, при которой происходит разрушение крупных гранул, об/сек;

частиц гранулируемой смеси происходит как образование новых, так и рост уже имеющихся гранул.

Факторами, влияющими на интенсивность перехода, будут являться влагосодержание гранулируемой смеси, ее способность к комкуемости, режимы работы гранулятора и особенности его конструкции. Интенсивность данного перехода определяется следующим выражением:

$K_n(1/сек)$, $K_s(1/сек \cdot м^2)$ – коэффициенты, учитывающие вклад соответствующего слагаемого выражения (16) в интенсивность перехода.

Таким же образом определялась интенсивность превращения первоначальной мелкодиспергированной смеси и вновь образовавшихся зародышей гранул в гарнисаж, а из гарнисажа – в небольшие гранулы.

Уплотнение гранул происходит как со стадией роста их зародышей, так и в процессе образования устойчивой гранулы. Как самостоятельная фаза процесса окончательное уплотнение гранулы происходит лишь на заключительной стадии процесса гранулирования. Агрегатированные, плотные гранулы ускоряют процесс роста гранул и их зародышей и одновременно стабилизируют сам процесс.

Наиболее существенным фактором, влияющим на плотность полученных при окатывании гранул, является влажность гранулируемой смеси. Также важными факторами являются свойства смеси

Таблица 1. Экспериментальные данные, характеризующие динамику процесса гранулообразования

Table 1. Experimental data on the granulation dynamics

№ пробы	t, мин	W, %	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
0	0	8,00	1,00	0	0	0	0	0	0
1	1	8,38	0,92	0,08	0	0	0	0	0
2	2	8,76	0,84	0,13	0,03	0	0	0	0
3	3	9,13	0,76	0,14	0,08	0,02	0	0	0
4	4	9,52	0,67	0,14	0,11	0,08	0	0	0
5	5	9,90	0,56	0,13	0,12	0,18	0	0,01	0
6	6	10,28	0,40	0,12	0,10	0,26	0	0,05	0,05
7	7	10,66	0,27	0,12	0,10	0,28	0	0,09	0,14
8	8	11,04	0,18	0,11	0,11	0,28	0	0,07	0,25
9	9	11,42	0,10	0,06	0,10	0,25	0,06	0,04	0,35
10	10	11,80	0,10	0,08	0,10	0,21	0,06	0,03	0,45
11	11	12,18	0,07	0,06	0,09	0,18	0,07	0,03	0,50
12	12	12,56	0,05	0,07	0,09	0,16	0,07	0,03	0,53
13	13	12,94	0,06	0,07	0,08	0,13	0,06	0,03	0,57
14	14	13,32	0,05	0,06	0,07	0,12	0,06	0,03	0,62
15	15	13,70	0,05	0,06	0,06	0,09	0,06	0,02	0,66
16	16	14,08	0,04	0,05	0,05	0,07	0,05	0,02	0,63

Таблица 2. Влияние параметров гранулятора и характеристик исходного продукта на качество готовых гранул

Table 2. Effect of granulator parameters and profile of the initial product on the quality of finished granules

№ опыта	W_m , %	α , град	N , об/мин	n , об/мин	K	F , кг/мин	Δt_w , мин	P_{oc}	P_6	P_7
1	8	45	28	2000	0,75	0,15	1	0,22	0,02	0,76
2	8	45	24	1800	0,70	0,12	0	0,19	0,30	0,51
3	9	45	28	2000	0,80	0,20	1	0,11	0,07	0,82
4	9	45	32	1800	0,70	0,10	0	0,25	0,12	0,63
5	10	40	28	1900	0,75	0	0	0,29	0,15	0,56
6	10	50	28	2000	0,80	0,05	0,5	0,06	0,14	0,80
7	10,5	45	28	2000	0,75	0,05	0,5	0,05	0,16	0,79
8	11	50	28	2000	0,75	0,02	0,5	0,09	0,15	0,76
9	12	45	32	1900	0,80	0	0	0,16	0,18	0,66
10	14	45	28	1800	0,65	0	0	0,34	0,20	0,46
11	14	50	28	1700	0,70	0	0	0,70	0,04	0,26

Таблица 3. Результаты моделирования процесса гранулирования при различных режимах и конструктивных параметров гранулятора тарельчатого типа и характеристик исходной смеси

Table 3. Simulation of the granulation process based on various modes and design parameters of the disk-type granulator and the profile of the initial mixture

№ опыта	W_m , %	α , град	N , об/мин	n , об/мин	K	F , кг/мин	Δt_w , мин	P_{oc}	P_6	P_7
1	8	45	28	2000	0,75	0,15	1	0,25	0,19	0,66
2	8	45	24	1800	0,70	0,12	0	0,19	0,29	0,50
3	9	45	28	2000	0,80	0,20	1	0,11	0,11	0,78
4	9	45	32	1800	0,70	0,10	0	0,28	0,15	0,57
5	10	40	28	1900	0,75	0	0	0,32	0,19	0,49
6	10	50	28	2000	0,80	0,05	0,5	0,08	0,14	0,78
7	10,5	45	28	2000	0,75	0,05	0,5	0,07	0,17	0,76
8	11	50	28	2000	0,75	0,02	0,5	0,11	0,15	0,74
9	12	45	32	1900	0,80	0	0	0,19	0,19	0,62
10	12	45	28	1800	0,70	0	0	0,25	0,17	0,58
11	14	45	28	1800	0,65	0	0	0,30	0,19	0,51
12	14	50	28	1700	0,70	0	0	0,38	0,23	0,39

и размеры гранул. Режимы гранулирования и конструктивные размеры гранулятора влияли в незначительной степени на плотность гранул. Плотность гранулы снижается по мере удаления от центра вращения тарели. Получать гранулы с необходимыми размерами и плотностью можно, варьируя силу удара по грануле [5]. Это достигается изменением угловой скорости гранулятора.

Тогда интенсивность уплотнения гранул, показанная на рисунке 1, как трансформация из состояния 4 в состояние 7 может быть записана в следующем виде (10):

$$\lambda_{47} = K_{47}P_4[K_W \exp(W/2,1) + K_k/(1-K)^{4,5} + K_y \Delta n/n_m] \quad (10)$$

где K_y – коэффициент, показывающий взаимосвязь интенсивности трансформации из состояния 4 в состояние 7 с угловой скоростью активатора, 1/сек.

В таблице 1 приведены экспериментальные данные, характеризующие динамику процесса гранулообразования. Они включают влажность смеси (W , %), вероятность пребывания полидисперсной

смеси в выделенных состояниях для моментов времени ($P_1(t) - P_2(t)$), которая определялась отношением массы смеси в каждом из состояний к первоначальной массе смеси с учетом объема жидкости для увлажнения смеси, добавляемой в гранулятор через форсунки.

Проверка постулированной модели проводилась экспериментальным путем. В ходе проведения экспериментов исследовалась динамика гранулообразования многокомпонентных смесей на основе молочной сыворотки и шрота клюквы.

На основании предварительно полученных данных, а также данных, установленных экспериментальным путем, были получены сведения о влиянии режимов гранулирования, режимов работы гранулятора и фазового состава исходной смеси на характеристики полученного гранулированного продукта (табл. 2).

Размеры гранул определялись с помощью набора стандартных сит (с отверстиями 1,0 и 3,0 мм). Определялось содержание гранул с размерами менее 1,0 мм, более 3,0 мм, а также в диапазоне от 1 до 3 мм.

При влажности исследуемой смеси более 11 % на боковых стенках и днище гранулятора оставался гарнисаж. В таблице 2 приведена вероятность образования гранулируемой смеси, содержащей гранулы менее 1 мм и гарнисажа P_{oc} .

Результаты моделирования процесса гранулирования полидисперсных продуктов при различных характеристиках и значениях конструктивно-режимных параметров, приведенных в таблице 2, показаны в таблице 3.

Проверка результатов, полученных на основании расчетов математической модели процесса гранулирования с результатами экспериментальных исследований, показала, что постулированная модель с достаточной точностью отражает физическую сущность процесса гранулирования полидисперсных смесей на основе местного сырья и молочной сыворотки.

Выводы

Созданы методы и способы регулирования

процесса гранулообразования полидисперсных смесей на основе молочной сыворотки в грануляторах тарельчатого типа.

Для расчета конструктивно-режимных параметров гранулятора, в зависимости от заданного качества продукта, разработана математическая модель процесса, сформированная на основании гипотезы о стохастическом характере протекающих процессов. Процесс гранулирования был описан как сочетание семи состояний в зависимости от гранулометрического состава и определенного времени гранулирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Maskan, M. Production of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice concentrate by various heating methods: Colour degradation and kinetics / M. Maskan // Journal of Food Engineering. – 2006. – Vol. 72, № 3. – P. 218–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.012>.
2. Использование биологически активных веществ лекарственных растений Сибири в функциональных напитках на основе молочной сыворотки / С. А. Иванова, И. С. Миленцева, Л. К. Асякина [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 1. – С. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-14-22>.
3. Влияние криопорошка «яблоко» на качество сывороточного напитка функционального назначения / А. П. Мансуров, В. А. Бочаров, Е. В. Пальчиков [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2019. – Т. 27, № 1. – С. 48–55.
4. Miraballes, M. Application of a pivot profile variant using CATA questions in the development of a whey-based fermented beverage / M. Miraballes, N. Hodos, A. Gambaro // Beverages. – 2018. – Vol. 4, № 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages4010011>.
5. Study of the process of concentration as a factor of product quality formation / A. L. Maytakov, S. T. Yusupov, A. M. Popov [et al.] // Foods and Raw Materials. – 2018. – Vol. 6, № 1. – P. 172–181. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-172-181>.
6. Harnessing the capabilities of spray granulation in the food industry for the production of functional foods / I. N. Tikhonova, A. M. Popov, N. V. Tikhonov [et al.] // Procedia Chemistry. – 2014. – Vol. 10. – P. 419–423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.070>.
7. Bhattacharjee, C. Fruit juice processing using membrane technology: A review / C. Bhattacharjee, V. K. Saxena, S. Dutta // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2017. – Vol. 43. – P. 136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>.
8. Кравченко, Э. Ф. Состояние и перспективы использования молочной сыворотки / Э. Ф. Кравченко // Сыроделие и маслоделие. – 2000. – № 2. – С. 28–29.
9. Совершенствование технологического потока линии производства инстантированного киселя / К. Б. Плотников, А. М. Попов, И. Б. Плотников [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 1. – С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-96-105>.
10. Optimization of concentration process on pomelo fruit juice using response surface methodology (RSM) / S. Keshani, A. Luqman Chuah, M. M. Nourouzi [et al.] // International Food Research Journal. – 2010. – Vol. 17, № 3. – P. 733–742.
11. Моделирование технологий производства многокомпонентных гранулированных продуктов / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Н. Т. Ветрова [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80, № 4 (78). – С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-63-68>.
12. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization / V. De Simone, D. Caccavo, G. Lamberti [et al.] // Powder Technology. – 2018. – Vol. 340. – P. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.053>.

13. Popov, A. M. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials / A. M. Popov, K. B. Plotnikov, D. V. Donya // *Foods and Raw Materials*. – 2017. – Vol. 5, № 1. – P. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
14. Thapa, P. Recent trends and future perspective of pharmaceutical wet granulation for better process understanding and product development / P. Thapa, J. Tripathi, S. H. Jeong // *Powder Technology*. – 2019. – Vol. 344. – P. 864–882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.080>.
15. Maharjan, R. High shear seeded granulation: Its preparation mechanism, formulation, process, evaluation, and mathematical simulation / R. Maharjan, S. H. Jeong // *Powder Technology*. – 2020. – Vol. 366. – P. 667–688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.020>.
16. Shanmugam, S. Granulation techniques and technologies: Recent progresses / S. Shanmugam // *BioImpacts*. – 2015. – Vol. 5, № 1. – P. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.15171/bi.2015.04>.
17. Диагностирование технологических параметров качества подсистемы коагуляционного структурирования гранул / Д. В. Дonya, Е. С. Миллер, А. А. Попов [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6–6. – С. 1144–1148.
18. Идентификация процесса гранулирования инстантированных полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором / А. М. Попов, М. А. Макковеев, Е. Б. Асташенко [и др.] // *Техника и технология пищевых производств*. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 60–65.

References

1. Maskan M. Production of pomegranate (*Punica granatum L.*) juice concentrate by various heating methods: Colour degradation and kinetics. *Journal of Food Engineering*. 2006;72(3):218–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.012>.
2. Ivanova SA, Milentyeva IS, Asyakina LK, Lukin AA, Kriger OV, Petrov AN. Biologically active substances of siberian medical plants in functional wgey-based drinks. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2019;49(1):14–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-14-22>.
3. Mansurov AP, Bocharov VA, Palchikov EV, Ratushny AS. Impact cryopowder “Apple” on the quality of whey beverage functional purpose. *Technologies of food and processing industry of AIC – healthy food*. 2019;27(1):48–55. (In Russ.).
4. Miraballes M, Hodos N, Gambaro A. Application of a pivot profile variant using CATA questions in the development of a whey-based fermented beverage. *Beverages*. 2018;4(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages4010011>.
5. Maytakov AL, Yusupov ST, Popov AM, Kravchenko SN, Bakin IA. Study of the process of concentration as a factor of product quality formation. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(1):172–181. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-172-181>.
6. Tikhonova IN, Popov AM, Tikhonov NV, Tikhonov VV. Harnessing the capabilities of spray granulation in the food industry for the production of functional foods. *Procedia Chemistry*. 2014;10:419–423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.070>.
7. Bhattacharjee C, Saxena VK, Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2017;43:136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>.
8. Kravchenko EhF. Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya molochnoy syvorotki [The state and prospects of using whey]. *Cheesemaking and Buttermaking*. 2000;(2):28–29. (In Russ.).
9. Plotnikov KB, Popov AM, Plotnikov IB, Kryuk RV, Rudnev SD. Improving the line of instant starch soft drinks. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(1):96–105. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-96-105>.
10. Keshani S, Luqman Chuah A, Nourouzi MM, Russly AR, Jamilah B. Optimization of concentration process on pomelo fruit juice using response surface methodology (RSM). *International Food Research Journal*. 2010;17(3):733–742.
11. Maytakov AL, Popov AM, Vetrova NT, Beryazeva LN, Zverikova MA. Modeling of manufacturing technologies for multicomponent granulated products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018;80(4) (78):63–68. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-63-68>.
12. De Simone V, Caccavo D, Lamberti G, Amore M, Barba AA. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization. *Powder Technology*. 2018;340:411–419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.053>.
13. Popov AM, Plotnikov KB, Donya DV. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials. *Foods and Raw Materials*. 2017;5(1):137–143. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
14. Thapa P, Tripathi J, Jeong SH. Recent trends and future perspective of pharmaceutical wet granulation for better process understanding and product development. *Powder Technology*. 2019;344:864–882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.080>.
15. Maharjan R, Jeong SH. High shear seeded granulation: Its preparation mechanism, formulation, process, evaluation, and mathematical simulation. *Powder Technology*. 2020;366:667–688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.020>.
16. Shanmugam S. Granulation techniques and technologies: Recent progresses. *BioImpacts*. 2015;5(1):55–63. DOI: <https://doi.org/10.15171/bi.2015.04>.

17. Donya DV, Miller ES, Popov AA, Popov AM, Romanenko RYu. Technological quality parameters diagnosing for subsystem of coagulation structuring of granule. *Fundamental research*. 2014;(6–6):1144–1148. (In Russ.).

18. Popov AM, Makkoveev MA, Astahenko EB, Chupin AV. Identification of granulation process of instantized polydispersed products in plate granulators with activator. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2010;17(2):60–65. (In Russ.).

Сведения об авторах

Майтаков Анатолий Леонидович

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, e-mail: may585417@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>

Information about the authors

Anatolij L. Maytakov

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes and Automatic Control Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, e-mail: may585417@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0714-204X>