УДК 544.031

А.М. Попов, Р.Ю. Романенко, Е.С. Миллер, Д.В. Доня, А.А. Попов

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрено применение закона постоянства объемного фазового состава дисперсной системы для получения материалов с оптимальной структурой и заданными свойствами. Выбран критерий оптимальности формирования структуры – объемное содержание твердой фазы. Для количественной оценки процесса структурообразования в динамике предложен структурно-энергетический параметр. Построены фазовые диаграммы технологии гранулирования и таблетирования киселя аронниевого, которые позволяют проанализировать процессы формирования дисперсной структуры и оценить энергоемкость процесса. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что применение закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем дает возможность теоретически и практически проанализировать различные технологии, технологические стадии и операции при получении материалов с заданными свойствами и упростить методику исследований дисперсных систем.

Дисперсная система, фазовый состав, структура, параметр, фазовая диаграмма.

Введение

В основе технологии получения полидисперсных продуктов лежат закономерности физико-химической механики – науки, изучающей процессы, которые ведут к изменению свойств, строения и состава вещества вследствие физико-химических преобразований. Это позволяет использовать рациональные методы переработки исходного сырья в целевые продукты разнообразного назначения [1, 2, 3]. Как показывает анализ многочисленных пищевых технологий, отличительной особенностью и необходимым условием является присутствие исходных веществ в тонкоизмельченном, дисперсном состоянии. Последнее предопределяет протекание ряда технологических операций дисперсных систем, характеризующихся поверхностными явлениями и физико-химическими процессами, характерными для данного технологического этапа [4, 5].

Как показывает практика, большинство технологий получения материалов на основе дисперсных систем и характерных для них физико-химических процессов можно представить в общем виде как технологическую цепочку процессов трансформации основных структур – коагуляционной, конденсационной и кристаллизационной, особенности протекания которых предопределяются свойствами и фазовым составом системы.

Под структурой в дисперсных системах рассматривают, прежде всего, расположение и взаимосвязь составляющих её элементов в пространстве. Каждая разновидность структуры отличается определенным набором и уровнем структурных характеристик, таких как:

– средний размер частиц и усредненное расстояние между ними;

– плотность частиц в единице объёма;

– удельная поверхность частиц или их дисперсность;

– объемная концентрация твердой, жидкой и газообразной фаз системы.

Системы являются стационарными, если их структурные характеристики не изменяются во времени. В технологии же требуется, чтобы структуры с пониженным уровнем организации и прочности преобразовывались в структуры более высокого порядка и прочности [2, 3]. Это достижимо при комплексном или единичном воздействии тепловой, химической, механической, электрической энергии, а также изменения свободной поверхностной энергии или величины межфазной поверхности. Если же при внешнем или внутреннем энергетическом воздействии достигается изменение структурных характеристик системы, то такие структуры и системы называются динамичными. Учитывая вышеизложенное, можно представить технологию материалов на основе дисперсных систем как последовательную цепь количественно-качественных изменений структуры дисперсной системы под действием внешних или внутренних энергетических воздействий, которые сопровождаются определенными физико-химическими процессами, обеспечивающими оптимальную организацию технологических операций. При этом они сопровождают любую технологическую стадию или операцию, обеспечивая важнейший принцип технологической согласованности скоростей изменения структурных характеристик динамичной системы, формирования структур и протекания физико-химических процессов.

Всё это потребовало разработки методик и методов управления протекающими процессами, обеспечивающих получение материалов с заданными свойствами, что невозможно без моделирования имеющихся пористых систем как в процессе их формирования, так и для конечного продукта. Для этой цели наиболее часто используется физическое моделирование или геометрическо-математическое, которые базируются или на геометрии правильных опорных упаковок частиц, или же вероятностном распределении частиц по размерам. Такие модели можно использовать для того, чтобы характеризовать стационарные дисперсные системы. В том случае, когда система развивается во времени самопроизвольно или под внешним воздействием, т.е. она динамичная, чтобы создать модель такой системы, требуется дополнительно знать структурные характеристики состояния системы и последующих

структур как в начальном состоянии, так и в процессе преобразования при воздействии технологических и физико-химических факторов. Чтобы упростить решение этой довольно трудной задачи, можно использовать объемные фазовые характеристики системы, которые находятся в тесной взаимосвязи с другими структурными характеристиками.

Объект и методы исследования

Часто для оценки количественного соотношения между фазами используют весовой способ, определяя относительное массовое содержание жидкой или твердой фазы или удельные характеристики, такие как истинная, кажущаяся и насыпная плотности, удельные объемы. Но их использование не даёт возможности четко оценить количественное содержании газовой фазы, которая тоже присутствует в двухфазной (Т+Г) или в трехфазной (Т+Ж+Г) системе. Поэтому для того чтобы охарактеризовать количественный состав дисперсных систем с учётом присутствия всех фаз независимо от вида технологического воздействия на систему, в качестве критерия берём объемное содержание фаз [1, 2]. Тогда исходя из закона постоянства объемного фазового состава дисперсной системы, соблюдение которого является вторым условием для получения материалов с оптимальной структурой и заданными свойствами, справедливо равенство:

$$K_{Т1}+K_{Ж1}+K_{Г1}=K_{Т2}+K_{Ж2}+K_{Г2}=....=K_{ТП}+K_{ЖП}+K_{ГП}=1, \quad (1)$$

где $K_Т$, $K_Ж$, $K_Г$ – содержание твердой, жидкой и газообразной фаз в системе, в единице объёма, на соответствующем технологическом этапе.

Использование этого закона с учётом специфики свойств твердой фазы, обусловливающего ее присутствие на протяжении всей технологической цепочки, позволяет применять в качестве критерия оптимальности формирования структуры её объемное содержание, что позволяет обозначить траекторию достижения заданных характеристик дисперсной системы графически на всем протяжении технологического процесса следующим образом (рис. 1).

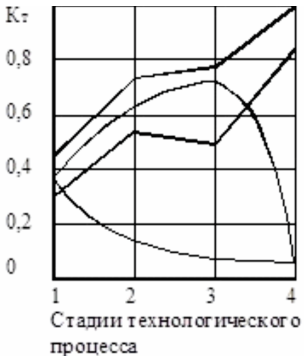

Рис. 1. Траектория достижения конечной цели технологии: 1 – приготовление дисперсной системы; 2 – придание формы; 3 – формирование конденсационной структуры; 4 – формирование кристаллизационной структуры (сплошная линия – траектория получения плотных материалов, пунктирная линия – траектория получения пористых материалов)

Взятая за основу для формования дисперсная система – порошок (K_{T1}=0,25–0,40) в процессе формования уплотняется, и у неё появляются новые структурные характеристики (K_{T2}=0,5–0,7), являющиеся, в свою очередь, начальными при формировании конденсационной структуры. Физико-химические свойства брикета или гранулы и режимы сушки влияют на изменения, происходящие в материалах при сушке, и на параметры сформованной конденсационной структуры (K_{T3}=0,5–0,78). Надо отметить, что формирование кристаллизационной структуры также зависит от ее начальных параметров, и обеспечение максимальной плотности изделий предопределяется дефектностью конденсационной структуры, и поэтому K_T необходимо увеличивать на всех технологических стадиях.

Если же нам необходима технология получения пористых материалов, то объемная концентрация твердой фазы K_T на всех этапах производства должна непрерывно уменьшаться или изменяться ступенчато.

Использование $K_Т$ в качестве критерия для оптимизации технологии формирования структуры весьма удобно, так как изменение $K_т$ лимитировано в пределах (0–1) [2].

Исходя из закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем, мы можем предложить параметр, который обладает, на наш взгляд, высокой информативностью о протекающих процессах при структурообразовании в динамичных системах. Структурно-энергетический параметр n – это параметр, показывающий относительное изменение объемной концентрации твердой и газообразной фаз или порового пространства при переходе дисперсной системы или структуры из одного состояния в другое, как в случае самопроизвольно протекающих процессов, так и в случаях внешнего энергетического воздействия. Структурно-энергетический параметр n функционально зависит не только от структурных и внутренних энергетических характеристик системы (свободная и химическая энергия межфазной поверхности, дисперсность), но и от величины внешнего энергетического воздействия, которая зависит от того, какое будет воздействие – механическое или тепловое. Величина параметра n, как функции $K_Т$ и пористости $П$ ($K_{Т2}$=f($K_{Т1}$), $П_2$=f($П_1$), $K_{Т2}/П_2$=f($K_{Т1}/П_1$)), определяется рядом соотношений характеристик структур начального и конечного состояний системы:

$$n=\frac{\frac{K_{Т2}}{П_2}}{\frac{K_{Т1}}{П_1}}=\frac{\frac{K_{Т2}}{K_{Т1}}}{\frac{П_2}{П_1}}=\frac{\frac{П_1}{П_2}}{\frac{K_{Т1}}{K_{Т2}}}=\frac{\frac{П_1}{K_{Т1}}}{\frac{П_2}{K_{Т2}}}=\frac{\frac{П_1}{K_{Т2}}}{\frac{П_2}{K_{Т1}}}. \quad (2)$$

Такая разнообразная графическая интерпретация величин, входящих в зависимость для определения параметра, позволяет наглядно продемонстрировать развитие процесса перестройки структуры в процессе всей технологической цепочки на всех стадиях или операциях.

Результаты и их обсуждение

Анализ значений структурно-энергетического параметра n при преобразованиях дисперсных структур позволяет сделать следующие выводы:

– n=1 характеризует стационарные структуры, в них практически никаких изменений под влиянием внешних воздействий не происходит;

– n>1 свойственно для динамичных структур и систем, изменения в которых сопровождаются уменьшением объема системы;

– n<1 характерно для динамичных структур, в которых все изменения сопровождаются увеличением объема системы;

– системы или структуры с более низким значением концентрации твердой фазы ($K_Т$=0,3–0,45) характеризуются повышенной чувствительностью к внешним воздействиям, чем с высоким значением концентрации ($K_Т$>0,7);

– большее отклонение системы от стационарного состояния возможно только при большем энергетическом воздействии на систему.

Это позволяет использовать структурно-энергетический параметр n как критерий количественной оценки процесса структурообразования в динамике в зависимости от мощности энергии внешнего или внутреннего воздействия на систему, в том числе и информацию о степени перестройки структуры α_n, величина которой ограничена в пределах (0–1):

$$\alpha_n = \frac{n_i - n_1}{n_i} = \frac{n_i - 1}{n_i}, \qquad (3)$$

где n_i – текущее значение параметра n; n_1 – начальное значение параметра n (n_i=l).

Из графика (рис. 2) следует, что наиболее интенсивное преобразование структуры имеет место при изменении n в пределах n=1 – 6 (α_n=0 – 0,84). Отметим, что при n=2 степень преобразования структуры достигает α_n=0,5 (50 %). Дальнейшее увеличение n (n>6) приводит к монотонному возрастанию α_n. При n=100, α_n=0,99.

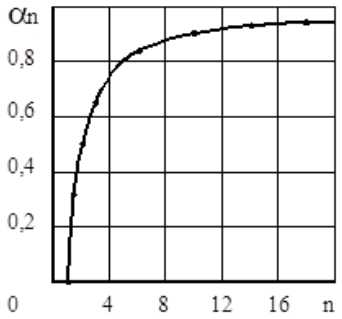

Рис. 2. Взаимосвязь степени перестройки структуры со значением параметра n

Нормирование изменения параметра n с целью обеспечения изменения закона нарастания α_n в пределах 0–1 позволяет использовать её в качестве характеристики степени превращения структуры в кинетике процессов, протекающих на различных технологических стадиях или операциях.

Использование закона постоянства фазового состава дисперсной системы в единице объема позволяет нам наглядно изображать процессы формирования дисперсной структуры на любой стадии технологического потока в тройной системе координат $K_Т$–$K_Ж$–$K_Г$ и получить полную фазовую диаграмму или, можно сказать, фазовый портрет всей технологии [2].

На рис. 3 представлен такой портрет технологии киселя арониевого по двум технологиям – гранулирования 1–2–3–4 и таблетирования 1–2'–3'–4'. Фазовый состав полидисперсной системы в смесителе в начале процесса смешивания изображается точкой 1. По линии 1–2 развивается процесс увлажнения массы, а точка 2 характеризует фазовый состав смеси перед гранулированием. Изменение фазового состава массы в процессе коагуляции во время гранулообразования изображается линиями 2–3 и прессования 2'–3'. В процессе сушки (t=60 °С) изменение фазового состава приводит к получению более плотной структуры таблетки (линия 3'–4') по сравнению с гранулой (3–4). Точки 3 и 3' характеризуют фазовый состав гранулы и таблетки перед сушкой. Из рис. 3 следует, что фазовая диаграмма технологии гранулирования складывается из фазовых диаграмм различных технологических процессоров.

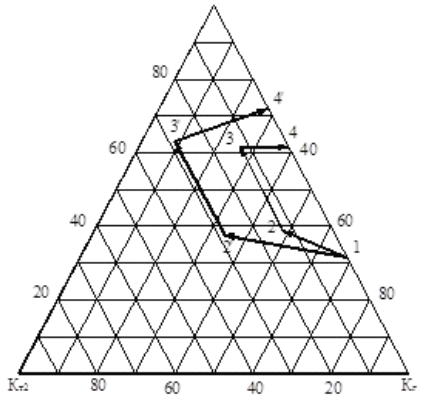

Рис. 3. Фазовые диаграммы технологий гранулирования (1–2–3–4) и таблетирования (1'–2'–3'–4') арониевого киселя: 1 – формовочная масса; 1–2 – увлажнение; 2, 2' – влажная масса; 2–3 – уплотнение гранулированием; 2'–3' – уплотнение при таблетировании; 3–4 – сушка при t=50 ºС после гранулирования; 3'–4' – сушка при t=50 ºС после таблетирования

При этом отметим, что фазовая диаграмма технологии показывает траекторию реализации поставленной цели не только по твёрдой фазе, но и с учётом жидкой и газообразной фаз [2]. Фазовые диаграммы позволяют анализировать процессы формирования дисперсной структуры в системах сахар – вода и лактоза – вода при получении вспененных материалов и для других технологий получения разнообразных пищевых продуктов. Кроме того, она позволяет оценить и энергоемкость процесса. Так, по рис. 3 видно, как широко расходится диаграмма таблетирования, а это повышенная влажность и больший объём сушки.

Выводы

Применение закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем даёт нам возможность теоретически и практически проанализировать различные технологии, технологические стадии и операции с тем, чтобы получить материалы с заданными свойствами. И более того, закон позволяет упростить методику исследований дисперсных систем, стандартизировать хотя бы элементы этих исследований, повысить эффективность технологического контроля процессов.

Список литературы

1. Попов, А.М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания / А.М. Попов – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. – 324 с.: ил. 56.

2. Лотов, В.А. Основы управления процессами структурообразования во влажных дисперсных системах / В.А. Лотов, В.В. Гурин, А.М. Попов / Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2006. – 295 с.: ил. 41.

3. Гамаюнов, Н.И. Тепломассоперенос в открытых системах: монография / Н. И. Гамаюнов, С. Н. Гамаюнов // Тверь: ТГТУ, 2009. – 256 с.

4. Попов, А.М. Использование фазовой диаграммы дисперсных систем при исследовании процесса сушки / А.М. Попов,А.Л. Майтаков, Л.Н. Берязева // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2011. – № 7. – С. 27–29.

5. Юфик, Я.М. Исследование кинетики структурообразования в твердеющих дисперсных системах методом внутреннего трения / Я.М. Юфик, Н.И. Гамаюнов // ИФЖ. – 1973. – Т. 24, № 6. – С. 1068.

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

A.M. Popov, R.Yu. Romanenko, E.S. Miller, D.V. Donya, A.A. Popov

THE MAIN OPTIMIZATION DIRECTIONS FOR STRUCTURE FORMATION IN DISPERSE SYSTEMS

Application of the law of volume phase structure constancy of the disperse system for receiving materials with optimum structure and set properties is considered. The criterion of optimality for structure formation, namely the firm phase volume is chosen. For quantitative assessment of the structurization process dynamics the structure and power parameter is offered. Phase diagrams of the granulation and tabletting technology for chokeberry kissel are made, which allows to analyse disperse structure formation processes and to estimate power consumption of the process. The conducted researches allowed to make a conclusion that application of the law of volume phase structure constancy of disperse systems gives the chance to theoretically and practically analyse various technologies, technological stages and operations when receiving materials with the set properties and to simplify the technique of researches of disperse systems.

Disperse system, phase structure, structure, parameter, phase chart.

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

Дата поступления: 07.10.2013