

УДК 664:541.182

**А.М. Попов, А.М. Сорочкин, А.А. Сарафанов, И.А. Михайлова, Е.И. Шилова****УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ И СВОЙСТВАМИ  
ВЛАЖНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ**

Рассмотрены современные представления о формах связи влаги с материалом и классификации отдельных ее видов. Представлены результаты исследований широкого круга материалов, которые позволяют сделать вывод о том, что при решении различных технологических проблем достаточно и целесообразно разделить физико-химически и физико-механически связанной воды на две основные категории влаги: капиллярно-подвижную и капиллярно-неподвижную.

Влага, вода, дисперсная система, сушка.

**Введение**

Научную основу приготовления быстрорастворимых продуктов составляет физико-химическая механика дисперсных систем. Эта наука возникла на стыке физикохимии, механики дисперсных систем, коллоидной химии и молекулярной физики. В настоящее время она широко применяется в разных областях получения дисперсных систем с заданными свойствами и структурой. Особенность данной отрасли науки состоит в оптимальном комплексном анализе механических воздействий, а также влиянии физико-химических и тепловых факторов на протекающие процессы. Технологические процессы тепло- и массообмена рассматриваются здесь как гетерогенные процессы в областях с соответствующими фазовыми границами, величина которых зависит от дисперсности системы. В соответствующем приближении физические системы можно разделить на грубодисперсные и микрогетерогенные системы. Критический размер твердых частиц в двухфазных дисперсных системах с газобразной дисперсионной средой  $d \approx 10^{-4}$  м, с жидкой дисперсионной средой низкой вязкости  $d \approx 10^{-5}$  м.

Путем измельчения и смешивания можно получить порошки требуемой структуры, например, смеси порошка какао и сахара, выпеченных изделий, молока, сливок, сыворотки, овощные и фруктовые порошки. Общее свойство таких полидисперсных продуктов – медленное и трудное растворение в воде при приготовлении из них жидкого раствора. Это свойство обусловлено особенностью их структуры. Сначала частицы порошка увлажняются под действием молекулярных сил, их удельный вес увеличивается, и они, медленно погружаясь, растворяются в воде, то есть диспергируются в жидкости. На процесс увлажнения главным образом влияет состояние поверхности твердой фазы. Процессы увлажнения и особенно процессы растворения зависят от свойств полидисперсного порошка. В результате интенсивного массообмена между водой и мелкими частичками с большой удельной поверхностью на фазовой границе «вода – порошок» возникает пленочный слой концентрированного раствора, который препятствует

проникновению жидкости в порошковый слой и вызывает комкование при перемешивании. Движущей силой проникновения внутрь слоя порошка увлажняющей жидкости является капиллярное давление; с другой стороны, характер капиллярно-пористых каналов в порошковом слое определяется также и поверхностными свойствами.

При современном уровне развития науки и техники актуальной задачей стало получение дисперсных систем с определенными свойствами для приготовления продуктов заданного качества. Такая же проблема требует решения при получении быстрорастворимых продуктов путем изменения структуры и размеров частиц, а также физико-химических свойств исходного материала.

**Объекты и методы исследований**

Среди большого многообразия дисперсных систем, используемых в технологии пищевых производств, наиболее распространены системы, в которых в качестве дисперсионной фазы используется вода. Физико-химические и физико-механические свойства этих дисперсных систем предопределяются содержанием и свойствами удерживаемой ими воды, которая вступает в сложнейшее взаимодействие с поверхностью частиц твердой фазы. Способность твердых тел к взаимодействию с водой определяется свойствами этих тел: химическим и минеральным составом, типом кристаллической решетки или клетки вещества, состоянием поверхности и многими другими факторами.

Сила взаимного сцепления частиц твердой фазы предопределяется в первую очередь величиной энергии взаимодействия пограничных молекул воды и твердой фазы и, как следствие, толщиной прослойки жидкости между частицами, от величины которой зависят структурно-механические и реологические свойства дисперсной системы.

Анализ современных представлений о формах связи влаги с материалом, классификации отдельных ее видов, результаты исследований широкого круга материалов, представленных в настоящей работе, позволяют сделать вывод о том, что при реше-

нии различных технологических проблем вполне достаточно и целесообразно разделение физико-химически и физико-механически связанной воды на две основные категории влаги: капиллярно-подвижную и капиллярно-неподвижную. Особенностью капиллярно-подвижной воды является ее способность передавать гидростатическое давление и перемещаться в структуре материала в виде жидкости. Капиллярно-неподвижная вода не передает гидростатического давления и может перемещаться в структуре материала в форме пара [4].

Условной границей между этими категориями влаги является наименьшая капиллярная влажность, при которой молекулы прочно- и слабосвязанной воды ориентируются молекулярным силовым полем поверхности частиц и приобретают свойство сплошности, образуя непрерывную сетку в межчастичном пространстве дисперсной системы. При  $W_{нкв}$  двухфазная дисперсная система (Т + Ж) обладает максимальной связностью, устойчивостью, плотностью, структурно-механическими, теплофизическими и реологическими свойствами.

Появление в системе капиллярно-подвижной воды при  $W > W_{нкв}$ , где  $W_{нкв}$  – наименьшая капиллярная влажность, приводит к увеличению толщины прослойки жидкости между частицами, что приводит к ослаблению сил межчастичного взаимодействия и усилению роли капиллярных сил. Важно и то, что в ориентированных силовым полем поверхности частиц слоях молекул воды при  $W_{нкв}$  практически полностью отсутствует броуновское движение. Молекулы капиллярно-подвижной воды, принимая участие в броуновском движении, увеличивают степень беспорядка в системе и уменьшают все основные ее свойства.

$W_{нкв}$  является узловой точкой количественно-качественных изменений, происходящих в дисперсной системе при увлажнении или обезвоживании, и по отношению  $W_{нкв}/(W_i - W_{нкв})$  можно прогнозировать связность и пластическую прочность влажного материала. По величине  $W_{нкв}$  можно судить о водоудерживающих свойствах дисперсной системы, которая, в свою очередь, предопределяется химическим, минеральным и гранулометрическим составом. Чем выше содержание частиц твердой фазы размером 0,5–1,0 мкм и менее, тем выше будет значение  $W_{нкв}$  и водоудерживающая способность дисперсной системы, а также ее структурно-механические свойства [5].

Поэтому величину  $W_{нкв}$  необходимо обязательно использовать в качестве комплексного параметра дисперсной системы при управлении ее свойствами. Определение  $W_{нкв}$  можно проводить двумя основными методами: методом капиллярной пропитки сухого слоя материала при различных значениях  $K_T$  либо по методу влагоемких сред Лебедева – Васильева (для набухающих или взаимодействующих с водой материалов).

Чрезвычайно важную информацию о структуре и свойствах дисперсной системы можно получить и при использовании объемных фазовых характеристик, получаемых при проведении компрессионных исследований путем перевода трехфазной системы в двухфазное (Т + Ж), водонасыщенное состояние или при капиллярной пропитке сухих (Т + Г) материа-

лов. Используя отношения фазовых характеристик (например,  $(K_{ж} + K_T)/K_T = (1 - K_T)/K_T$ ), можно получить пропорциональное отношение размера пор к размеру частиц или, при известной удельной поверхности, определить толщину газожидкостной прослойки между частицами по формуле

$$\delta_{пл} = \frac{1 - K_m}{S_v}, \quad (1)$$

где  $S_v$  – удельная поверхность единицы объема материала,  $м^2/м^3$ .

Из графической зависимости (рис. 1) видно, что толщина газожидкостной прослойки предопределяется влагосодержанием материала, его дисперсностью ( $S_{уд}$ ) и гранулометрическим составом, а точнее, соотношением между его грубодисперсной и тонкодисперсной составляющими. Сравнивая характер зависимостей  $\delta_{пл} = f(W)$  и  $P_m = f(W)$ , можно прийти к выводу, что пластическая прочность влажного материала прямо пропорциональна величине  $1/\delta_{пл}$ :

$$P_m = K/\delta_{пл}, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от дисперсности, гранулометрического состава и природы материала [1].

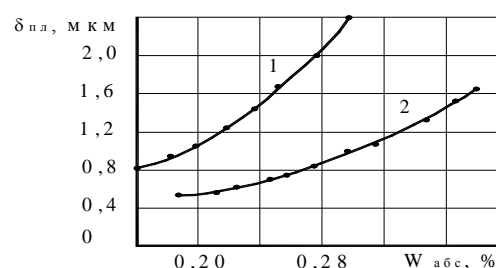


Рис. 1. Взаимосвязь между абсолютной влажностью материала ( $W_{абс}$ ) и толщиной межчастичных прослоек ( $\delta_{пл}$ ): 1 и 2 – номер смеси

### Результаты и их обсуждение

Эти графические зависимости позволяют также объяснить причину различного поведения грубодисперсных и пластичных материалов при определении пластической прочности. Если грубодисперсные материалы резко уменьшают свою прочность при небольшом увеличении влажности, то пластичные не столь чувствительны к изменению влагосодержания.

Поэтому для повышения эффективности управления свойствами дисперсных систем целесообразно иметь представление о составе и свойствах двух основных ее частей – структурного каркаса и порового вещества. Структурный каркас формируется из относительно грубодисперсных частиц, в промежутках между которыми размещается тонкодисперсная часть материала. Соотношение между этими частями определяется на основе траектории дос-

тижения максимальной степени упаковки частиц  $K_T$  в зависимости от зернового состава смеси.

Весьма эффективно использование для этих целей отношения  $\Delta W/\Delta K_T$ , отражающего принцип технологического соответствия между уплотнением материала и его влагосодержанием при проведении компрессионных исследований материалов с различным начальным влагосодержанием или при исследовании закономерностей капиллярной пропитки слоя сухого материала с различной начальной плотностью. Линейный характер зависимости  $K_T = f(W)$  позволяет определить отношение  $\Delta W/\Delta K_T$ , значение которого изменяется в пределах 0,4–1,0, если частицы структурного каркаса не обладают пористостью. Изменению объемной концентрации твердой фазы  $\Delta K_T$  соответствует строго определенное изменение влагосодержания  $\Delta W$ , и отношение  $\Delta W/\Delta K_T$  является постоянной величиной для данного материала. По этой величине можно оценивать уплотняемость, гранулируемость и формуемость материалов. Оптимальность гранулометрического состава твердой фазы можно оценить по величине параметра  $n$  и зависимостей  $K_T = f(W)$  для смесей с различным дисперсным составом при  $\Delta W = \text{const}$ . При этом смеси с оптимальным составом будут характеризоваться минимальным значением параметра  $n$ , свидетельствующим о небольшой перестройке структуры при переходе ее из одного состояния в другое.

Наличие тонкодисперсного порового вещества является обязательным условием стабильности влажной дисперсной системы, так как свойства образующейся поровой суспензии определяют структурно-механические и реологические свойства всего материала [2].

Таким образом, использование научно обоснованных методов управления свойствами дисперсных систем, направленных на формирование оптимальных свойств этих систем, является основой формирования оптимальных структур на последующих технологических стадиях.

Процесс сушки связнодисперсных материалов с заданной формой и размерами по сравнению с сухой сыпучих, свободнодисперсных влажных материалов отличается интенсивностью развития массообменных процессов, обусловленных достижением разных конечных результатов. Важнейшей задачей сушки материалов с заданной формой является не только сохранение внешних геометрических размеров и формы, но и создание в этих изделиях плотной, однородной и прочной конденсационно-кристаллизационной структуры. Поэтому управление процессом сушки таких материалов с целью ее интенсификации предполагает знание закономерностей протекания не только массообменных процессов, но и закономерностей перемещения и удаления влаги из материалов и развития усадочных явлений при сушке.

Влажные материалы с заданной формой являются чрезвычайно сложными объектами сушки, и контролировать изменение свойств влажного материала, а особенно его структуры, на основе данных баланса массы достаточно сложно.

Информацию принципиально иного характера о перестройке структуры можно получить, исполь-

зуя правило баланса объемов, являющееся частным случаем закона постоянства объемного фазового состава дисперсной системы применительно к процессу сушки. Согласно правилу баланса объемов при любом способе сушки и интенсивности ее осуществления сумма объемных концентраций составляющих фаз системы в любой момент времени сушки есть величина постоянная. Правило баланса объемов является первым, основополагающим принципом управления процессом сушки влажных материалов с заданной формой.

Вторым принципом управления процессом сушки является принцип технологического соответствия скорости испарения влаги с поверхности материала (режим сушки) и скорости диффузии влаги к поверхности (природа материала). Третьим принципом управления процессом сушки является принцип соответствия или равенства скоростей протекания физико-химических процессов перемещения влаги из массива к поверхности и усадочных процессов в структуре материала.

Необходимость соответствия скоростей технологического воздействия и сопутствующих физико-химических явлений приводит к выводу, что эффективность формирования структуры изделий при сушке предопределяется режимными параметрами сушки и свойствами высушиваемого материала. Из этого следует, что режимные параметры сушки необходимо назначать с учетом свойств материала, которые предопределяют соотношение капиллярно-подвижной и капиллярно-неподвижной воды. В качестве комплексного параметра для оценки свойств материала целесообразно использовать величину наименьшей капиллярной влажности – узловой точки количественно-качественных изменений в дисперсной системе. При  $W_{\text{нкв}}$  заканчивается процесс усадки влажного материала, величина которой предопределяется количеством капиллярно-подвижной воды. Поэтому наиболее эффективным приемом при управлении процессом сушки является предельно возможное уменьшение количества капиллярно-подвижной воды, удаление которой требует применения очень мягких, но длительных по времени режимов сушки.

При  $W_{\text{нкв}}$  вследствие достаточно высокой степени ориентации молекул воды силовым полем поверхности частиц резко изменяются теплофизические характеристики влажного материала, что приводит к более интенсивному распространению тепла в материале и его прогреву, вследствие чего происходит достаточно быстрое углубление зоны испарения влаги в массиве материала и удаление  $W_{\text{нкв}}$  можно провести за короткий промежуток времени, применяя жесткие режимы и не опасаясь развития усадочных явлений.

Удаление капиллярно-подвижной воды можно интенсифицировать с помощью контактного влагообмена высушиваемого материала с каким-либо влагоемким материалом, однако этот способ можно применять при сушке единичных крупногабаритных изделий либо при сушке малогабаритных изделий при их массовом производстве.

Свойства высушиваемого материала предопределяют усадку при сушке и способность противостоять усадочным напряжениям. Необходимые

свойства можно придать материалу при соблюдении следующих условий:

- материал должен обладать дисперсным составом, обеспечивающим максимально плотную упаковку частиц, что можно достичь при определенном количественном соотношении структурного каркаса и порового вещества;

- свойства поровой суспензии предопределяют уровень сил адгезионно-когезионного взаимодействия, и необходимо, чтобы силы когезионного взаимодействия в поровой суспензии были равными адгезионным силам на границе между поровой суспензией и частицами структурного каркаса;

- введение в состав поровой суспензии веществ, способных образовывать частицы молекулярного размера, повышает уровень сил когезионно-адгезионного взаимодействия при сушке; в качестве таких веществ можно использовать водорастворимые ПАВ, белки, гели и др.;

- потенциальный уровень сил адгезионно-когезионного взаимодействия можно косвенно оценить по величине  $W_{нкв}$ . Если  $W_{нкв} < 14\%$ , то влажный материал содержит недостаточное количество порового вещества и незначительное увеличение капиллярно-подвижной влаги в материале приводит к резкому снижению связности массы вследствие уменьшения концентрации поровой суспензии и сил адгезионно-когезионного взаимодействия. При значениях  $W_{нкв} > 14\%$  такие явления во влажном материале будут проявляться в меньшей степени.

Поэтому наиболее предпочтительной является сушка материалов, сформированных при  $W_{нкв}$ , когда уровень сил адгезионно-когезионного взаимодействия в массе будет максимальным.

Эффективное управление процессом формирования структуры изделий при сушке предполагает использование в качестве контролирующих параметров объемных фазовых характеристик материала,

структурно-энергетического параметра или степени перестройки структуры. По изменению фазовых характеристик материала в процессе сушки весь процесс можно наглядно представить в виде фазовой диаграммы или оценить высушиваемый материал с помощью различных коэффициентов чувствительности к сушке, можно оценить влияние различных свойств высушиваемого материала или режимных параметров на его поведение при сушке.

Применение объемных фазовых характеристик позволяет установить для процесса сушки влажных материалов с заданной формой следующие закономерности: независимо от температуры сушки материала сумма относительных значений объема усадки материала при сушке и объема его пор после сушки для данного материала есть величина постоянная и равна суммарному количеству объемного содержания жидкой и газовой фаз в исходном материале до сушки:

$$V_{yc} + V_{пор} = K_{ж1} + K_{г1}, \quad (3)$$

причем чем меньше значения правой и левой частей этого выражения, тем менее чувствителен материал к сушке.

Полученное соотношение является выражением баланса объема фаз в материале при сушке и частным случаем закона постоянства объемного фазового состава дисперсной системы.

Контроль качества готового изделия в пищевой промышленности чаще всего ведется по органолептическим оценкам. При производстве концентратов напитков к ним добавляются такие показатели качества, как скорость растворения, восстанавливаемость структуры напитка, устойчивость структурированного коллоидного раствора. Поэтому показатели качества гранулы  $P$ ,  $n$ ,  $K_t$  и др. в конечном виде устанавливаются по характеристикам готового продукта [3].

#### Список литературы

1. Попов, А.М. Инстант-продукты с использованием селективно измельченного растительного сырья / А.М. Попов, А.В. Сухоруков, С.Д. Руднев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2009. – № 4. – С. 56–58.
2. Попов, А.М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания / А.М. Попов. – Новосибирск: Сиб. ун-в. изд-во, 2002. – 324 с.
3. Попов, А.М. Чувствительность влажных дисперсных материалов к сушке и методы ее оценки / А.М. Попов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 2. – С. 32–35.
4. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1966. – 284 с.
5. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1978. – 368 с.
6. Круглик, В.И. Анализ режимов сушки гидролизатов в связи с использованием в технологии продуктов специального назначения / В.И. Круглик // Техника и технология пищевых производств. – 2009. – № 1. – С. 7.

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.M. Popov, A.M. Sorochkin, A.A. Sarafanov, I.A. Mikhailova, E.I. Shilova**

**Control of wet disperse systems structure and properties**

The article concerns modern views of connection forms between moisture and material and classifications of its separate kinds. The results of researches on a wide range of materials allowing to draw a conclusion that solving various technological problems, it is quite enough to separate physico-chemically and physico-mechanically connected water into two basic moisture categories: capillary-mobile and capillary-motionless.

Moisture, water, disperse system, drying.

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

