

УДК 628.336.44:664

**СУШКА МАТЕРИАЛОВ СО СПУТНИКОМ**

**Попов А.М., Дonya Д.В., Кравченко С.Н., Плотникова И.О., Плотников К.Б., Коняев А.В.**  
*ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)»,  
Кемерово, e-mail: popov4116@yandex.ru*

Настоящая статья посвящена исследованиям сушки свежесформированных материалов с использованием влагоемких сред-спутников. В качестве спутника применялась сахарная пудра, обладающая большой влагоемкостью, кроме того она предотвращает слипание гранул после выхода с гранулятора. Установлено, что применение спутника ускоряет процесс сушки за счет происходящего между материалом и спутником контактного влагообмена, это приводит к бездефективному извлечению влаги из высушиваемого изделия. Проведенные исследования позволили предложить комбинированный способ сушки. Данный способ сушки позволяет практически исключить из процесса тепловой сушки наиболее опасный период, когда происходит усадка материала, образование трещин и происходит увеличение жидкой фазы за счет растворения растворимой твердой фазы. При комбинированном способе сушки, благодаря возможности применения жестких режимов сушки, время сушки уменьшается в 5–7 раз.

**Ключевые слова:** дисперсионная среда, гранулирование, сушка со спутником, гранулы

**DRYING MATERIALS WITH SATELLITES**

**Popov A.M., Donya D.V., Kravchenko S.N., Plotnikova I.O., Plotnikov K.B., Konyaev A.V.**  
*Federal State-owned Budgetary Educational Institution of Higher Vocational Education Kemerovo  
Institute of Food Science and Technology, Kemerovo, e-mail: popov4116@yandex.ru*

This article is devoted to research of drying the freshly material using absorbent media satellites. As the satellite used powdered sugar with a high moisture content, in addition, it prevents the adhesion of the pellets after leaving the pellet mill. The use of the satellite accelerates the drying process due to take place between the material and the companion contact of moisture, this leads to betterchina extracting moisture from the drying product. Carried out researches have allowed to offer a combined drying method. This method of drying eliminates from the process of thermal drying is the most dangerous period occurs when the material shrinkage, cracking and increases the liquid phase due to dissolution of soluble solid phase. The combined method of drying, thanks to the use of hard modes of drying, drying time reduced by 5–7 times.

**Keywords:** dispersion medium, granulation, drying with a satellite, granules

С позиций физико-химической механики процесс сушки влажных сформованных материалов является процессом перевода коагуляционной структуры в конденсационную или конденсационно-кристаллизационную, сопровождающимся значительным изменением структуры, плотности и прочности изделий. В соответствии со схемой взаимопревращений дисперсных структур каждый тип дисперсной структуры характеризуется своим значением объемной концентрации твердой фазы. Как правило, изделия пластического формования с оптимальной формовочной влажностью характеризуются содержанием твердой фазы  $K_T = 0,55 - 0,60$ , жидкой  $K_{ж} = 0,36 - 0,42$ , газовой  $K_g = 0,020 - 0,005$ . Из этого следует, что у формовочных масс с повышенным содержанием частиц мелкодисперсной фракции, толщина газожидкостной прослойки между частицами составляет примерно 0,9–1,0 мкм, в то время как у крупнозернистых смесей толщина прослоек выше и составляет 1,4–1,6 мкм. Несмотря на то, что толщина газожидкостной прослойки представляет собой некоторую условную величину, ее использование, наряду с другими параметра-

ми дисперсной системы, позволяет составить наглядную модель процесса удаления влаги при сушке и изменения структурно-механических характеристик.

Тепловое воздействие при сушке переводит коагуляционную структуру из стационарного состояния в динамическое, при котором происходит изменение структурных характеристик системы. Процесс сушки связан также с изменением фазовых характеристик системы, обусловленным удалением влаги из материала, сопровождающимся усадкой материала вследствие уменьшения толщины газожидкостных прослоек между частицами, потерей прочности, вследствие увеличения жидкой фазы при растворении растворимых частиц (например, сахара) или расслоении влагоемких частиц (например, крахмала). Поэтому центральными вопросами статистики процесса сушки являются формы связи влаги с материалом и структурные характеристики дисперсных систем.

Форма связи влаги с материалом имеет принципиально важное значение при разработке вопросов кинетики и динамики процесса сушки, и, как известно, П.А. Ребиндер предложил свою классификацию форм свя-

зи влаги применительно к процессу сушки, так как состояние влаги в материале предопределяет интенсивность и режимные параметры процесса сушки материалов. Если рассматривать процесс приготовления формовочной массы как прямой процесс, а процесс сушки – как обратный процесс, то эта аналогия дает возможность использования анализа вопросов формы связи влаги с материалом применительно к процессу сушки. Этот анализ показывает, что всю влагу, содержащуюся в формовочной массе, можно разделить на два вида – капиллярно-подвижную и капиллярно-неподвижную.

Первый вид влаги способен передавать гидростатическое давление, и при уплотнении массы эта влага выжимается из нее, а при удалении влаги с помощью сушки капиллярно-подвижная влага перемещается по структуре материала также в виде жидкости к поверхности испарения. Второй вид влаги, или капиллярно-неподвижная влага, не способна передавать гидростатическое давление и не удаляется из материала при его механическом уплотнении. Эту влагу можно удалить только при сушке.

Анализ поведения дисперсных систем, позволяет убедиться в том, что структурные и фазовые характеристики дисперсных систем находятся в теснейшей взаимосвязи. Так, например, увеличение содержания жидкой фазы в двухфазной системе изменяет ее сыпучесть, повышает связность материала, который приобретает свойства пластичности и прочности. Структурно-механические, реологические и формовочные свойства дисперсной системы предопределяются содержанием влаги в массе и оптимальностью соотношения количества и свойств структурного каркаса и порового вещества. Начальное влагосодержание в системах предопределяет прочность сформировавшейся в процессе твердения кристаллизационной структуры. При этом, независимо от природы твердой фазы дисперсной системы, проявляется линейная зависимость между  $K_T$  и влагосодержанием материала при  $W \geq W_{нкв}^T$ :

$$K_T = bW + a, \quad (1)$$

где  $a, b$  – постоянные для данного материала коэффициенты.

В этом уравнении величина  $K_T$  приобретает двойное смысловое значение, то есть она характеризует и объемную концентрацию твердой фазы и степень уплотнения частиц твердой фазы как структурной характеристики влажного материала.

Перевод коагуляционной структуры в конденсационную при сушке будет происходить с присущими этому процессу

закономерностями, и построение физико-математической модели динамичной структуры в процессе сушки является пока неразрешимой проблемой. Эту проблему можно решить при использовании объемных фазовых характеристик системы, находящихся в тесной взаимосвязи с такими структурными характеристиками, как размер, форма, число частиц, дисперсность и гранулометрический состав, число и площадь контактов между частицами. Именно фазовые характеристики являются основой для составления баланса объемов материала в процессе сушки на основе закона постоянства объемного фазового состава дисперсной системы:

$$K_{T1} + K_{ж1} + K_{T1} = K_{T2} + K_{ж2} + K_{T2} = K_{T3} + K_{T3} = 1, \quad (1)$$

где  $K_{T1}, K_{ж1}, K_{T1}$  – фазовые характеристики системы до сушки;

$K_{T2}, K_{ж2}, K_{T2}$  – фазовые характеристики системы в любое время сушки;

$K_{T3}, K_{T3}$  – фазовые характеристики системы при полном удалении влаги из материала.

На основе равенства (1) правило баланса объемов можно сформулировать следующим образом: при любом способе сушки и интенсивности ее осуществления сумма объемных концентраций составляющих фаз системы в любой момент времени есть величина постоянная.

Использование баланса объемов позволяет осуществлять контроль за любыми изменениями структуры материала в процессе сушки с привлечением для этой цели таких критериев структурообразования, как объемная концентрация твердой фазы  $K_T$  и структурно-энергетического параметра  $n$ . Относительное изменение отношений фазовых характеристик системы при сушке определяется по формуле

$$n = \frac{K_{T2}/\Pi_2}{K_{T1}/\Pi_1} = \frac{K_{T2}/K_{T1}}{\Pi_2/\Pi_1} = \frac{\Pi_1/K_{T1}}{\Pi_2/K_{T2}}, \quad (2)$$

где  $K_{T1}, \Pi_1$  – фазовые характеристики системы до сушки;

$K_{T2}, \Pi_2$  – фазовые характеристики системы после сушки.

Анализ формулы (2) применительно к процессу сушки позволяет сделать следующие выводы:

– тепловое воздействие на влажный материал при сушке переводит систему из стационарного состояния в динамическое;

– чем больше отклоняется система от стационарного состояния под влиянием внешнего воздействия, тем большее энергетическое воздействие оказывается на систему;

– если в процессе сушки влажного материала происходит уплотнение твердой фазы ( $K_{T1} < K_{T2}$ ) или наблюдается постоян-

ство концентрации твердой фазы ( $K_{t1} = K_{t2}$ ), то такой режим сушки следует считать оптимальным;

– если в процессе сушки влажного материала происходит расширение системы, то есть увеличение объема материала ( $K_{t1} > K_{t2}$ ), то такой режим сушки является недопустимым;

– увеличение влагосодержания ( $K_{ж}$ ) материала в начальном состоянии приводит к значительным и нежелательным изменениям фазовых характеристик системы;

– использование величины  $K_t$  позволяет проводить количественную оценку качественных изменений, происходящих в материале в процессе сушки, и оценивать эффективность действия различных технологических приемов, направленных на снижение чувствительности материала к сушке.

По классификации А.В. Лыкова [4], влажные дисперсные материалы, полученные по методу пластического формования, можно отнести к капиллярно-пористым материалам с коагуляционной структурой. Сушка свежесформованных материалов, с точки зрения физико-химической механики, является процессом перехода коагуляционной структуры в конденсационную, в результате которого происходят значительные изменения объема материала и увеличиваются его структурно-механические характеристики. Основным критерием качества высушенных материалов является их плотность, которая зависит от способа сушки и режима ее протекания [3].

Правильный выбор максимально допустимой скорости сушки является основным при решении вопросов получения бездефективных изделий и ускорения процесса сушки. В начальный период сушки происходит удаление капиллярно-подвижной влаги, скорость сушки на этом этапе имеет наиболее важное значение для качества изделий. В случае превышения в начальный период допустимых значений скорости сушки возникает большая вероятность локального трещинообразования из-за возникновения значительных градиентов влажности и температуры в высушиваемом изделии [7]. Устранение эффекта трещинообразования при сушке возможно различными способами, одним из которых является использование влагоемких сред-спутников. Применение данного спутника ускоряет процесс сушки за счет происходящего между материалом и спутником контактного влагообмена, что приводит к бездефективному извлечению влаги из высушиваемого изделия. Исследования, проведенные К. Ласлоне [2], показали, что использование подложки из фильтровальной бумаги в качестве спутника при сушке модельных капиллярно-пори-

стых тел (морковь, картофель) интенсифицирует сушку в начальный период.

В технологии гранулирования киселя на тарельчатом грануляторе имеется необходимость интенсификации процесса сушки и получения бездефективных сухих изделий, что в свою очередь так же влияет на физико-химические свойства полученных растворов из этих гранул [6]. Сформированные гранулы, имеющие размер 1,5–3 мм, поступающие на сушку без применения в начальный период спутника теряют свою прочность [1]. В качестве спутника может применяться сахарная пудра, обладающая большой влагоемкостью, кроме того она предотвращает слипание гранул после выхода с гранулятора.

Исследование влияния спутника на процесс сушки малогабаритных изделий, сформированных пластическим формованием проводилось на образцах в виде таблеток диаметром 15 мм и высотой 3 мм [5], полученных из массы с влажностью  $W = 30\%$ .

Исследование процесса сушки материала с применением спутника проводилось по следующей методике. Образцы, с известным начальным влагосодержанием, помещались в сахарную пудру, которая под действием капиллярных сил слоем покрывала образцы. Обработанные образцы помещались в радиационную сушилку с дисковым металлическим излучателем. По истечении определенных промежутков времени образцы извлекались из сушилки, кисточкой очищались от слоя сахарной пудры и взвешивались, после этого образцы помещались в сушильный шкаф с температурой 105 °С для окончательной досушки. Влагосодержание образцов определяли по убыли влаги в процессе сушки. Для выяснения степени влияния спутника на кинетику процесса сушки проводилась радиационная сушка образцов без спутника в идентичных условиях. Результаты исследований, приведены в табл. 1.

Исследования показывали, что применение спутника ускоряет удаление влаги в период прогрева материала и в начальный период с постоянной скоростью сушки при температурах до 100 °С. Однако при температурах более 100 °С влияние спутника на кинетику сушки уменьшается, скорость сушки со спутником значительно снижается после убыли влагосодержания до 20–22 %.

Была проведена проверка влияния спутника на влагоудаление при температуре 20 °С, то есть при практическом отсутствии температурного градиента. Результаты этого исследования, представленные в табл. 2, показывают, что только за счет контактного влагообмена влагосодержание образцов снижается с 30% до 20–21%, то есть до значения наименьшей капиллярной влажности этого материала.

**Таблица 1**

Влияние режима и способа сушки образцов на кинетику влагоудаления

Время сушки, мин	Температура сушки/температура материала, °С			
	50	65	100/63	150/78
Радиационная сушка / Радиационная сушка со спутником				
3	28,5	25,1	19,8	8,3
	23,8	22,2	18,3	12,0
5	26,0	22,1	12,8	2,5
	20,7	18,4	14,2	4,8
10	22,0	14,5	2,5	0,3
	17,2	13,7	4,9	0,3
15	18,0	8,6	0,3	–
	14,0	10,0	1,1	–
20	14,0	4,9	0,3	–
	11,3	7,1	0,5	–
30	6,2	0,9	–	–
	6,5	2,4	–	–
40	1,7	0,3	–	–
	3,1	0,3	–	–

**Таблица 2**

Зависимость влагосодержания образцов от времени контакта со спутником

Время контакта, мин	1	3	5	10	15	20	25	30
Влагосодержание, %	28,2	25,1	23,6	22,2	21,5	20,7	20,3	19,8

Таким образом, установлено что спутник, при капиллярном влагообмене, удаляет из высушиваемого материала капиллярно-подвижную влагу, в результате чего происходит предельное уплотнение влажного материала и увеличиваются его механические свойства. Если процесс сушки материала происходит при температурах свыше 50 °С, то спутник является своеобразной оболочкой, с поверхностью которой происходит теплообмен и влагообмен с окружающей средой. Это значительно снижает градиенты влажности и температуры в высушиваемом материале в наиболее опасный период сушки. Кроме того, спутник приводит к дополнительному сопротивлению выхода пара в окружающую среду, чем снижает движущую силу процесса сушки, этим объясняется замедление влагоудаления в конечном периоде сушки.

Начальное снижение влагосодержания материала позволяет увеличить температуру сушки и, как следствие, интенсифицировать процесс сушки, так как в материале будет отсутствовать капиллярно-подвижная влага, а оставшаяся будет удаляться в виде пара.

Проведенные исследования позволили предложить комбинированный способ сушки, заключающийся в том, что образцы,

предварительно обезвоженные до начальной формовочной влажности во влагоемкой среде, подвергаются сушке в присутствии спутника при жестком температурном режиме. Данный способ сушки позволяет практически исключить из процесса тепловой сушки наиболее опасный период, когда происходит усадка материала, образование трещин и происходит увеличение жидкой фазы за счет растворения растворимой твердой фазы.

При сравнении плотности образцов, высушенных радиационным, радиационным со спутником и комбинированным способом, установлено, что применение комбинированного способа сушки наиболее целесообразно как с точки зрения интенсификации процесса сушки, так и для повышения качества. При комбинированном способе, благодаря возможности применения жестких режимов сушки, время сушки уменьшается в 5–7 раз. Вывод об отрицательной роли капиллярно-подвижной воды в процессе сушки влажных материалов подтверждается характером структуры образцов, высушенных радиационным способом при большой тепловой нагрузке, наличием трещинообразования даже у малогабаритных изделий пластического формования.

На основе полученных закономерностей процесса сушки гранулированных продуктов можно сделать следующие выводы, способствующие интенсификации процесса сушки и повышению качества изделий:

– при удалении капиллярно-подвижной воды из гранулы необходимо поддерживать мягкие режимы сушки, обеспечивающие небольшие градиенты температуры и влажности по сечению изделия;

– подача на завершающем этапе гранулирования сахарной пудры в гранулятор обеспечивает вытягивание влаги из центра гранулы;

– применение комбинированного способа сушки позволяет уменьшить время сушки в 5–7 раз, благодаря возможности применения жестких режимов сушки.

### Список литературы

1. Андронников О.В. Некоторые особенности процесса грануляции порошкообразных материалов в аппаратах с вращающимися рабочими органами / О.В. Андронников, П.В. Гордиенко, Б.Н. Процышин // Пром. теплотехн. – 1995. – Т. 17, № 1–3. – С. 51–53.
2. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
3. Лотов В.А. Закономерности оптимального формирования структур в технологии материалов на основе силикатных дисперсных систем / В.А. Лотов. – Томск, 2002. – 46 с.
4. Лыков А.В. Прогноз развития науки о сушке капиллярно-пористых коллоидных тел / А.В. Лыков. // ИФЖ. – 1970. – № 4. – С. 609–616.
5. Попов А.М. Анализ и синтез технологий гранулированных концентратов напитков / А.М. Попов. – Кемерово, 2003. – 245 с.
6. Сорокопуд А.Ф. Физико-химические свойства водных и водно-спиртовых экстрактов голубики / А.Ф. Сорокопуд, И.Б. Плотников // Пиво и напитки. – 2010. – № 6. – С. 38–40.
7. Rumpf H., Grundlagtn und Methoden des Granulierens / ChemiEng. Techn, 1998. – Т. 70, №6. – Р. 590–624.