

УДК 664.8.047:615.322

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

Настоящая статья посвящена исследованию изменений структурно-фазовых характеристик дисперсных систем в зависимости от их теплофизических свойств. При рассмотрении структурных характеристик между различными фазами с использованием различных критериев подобия можно сделать вывод, что наиболее распространенным способом оценки количественного соотношения между фазами является весовой. Этот метод не позволяет получить полную картину протекающих процессов во время сушки, так как при рассмотрении удельного содержания компонентов в системе не берется во внимание газовая фаза, однако она способна оказывать значительное влияние на изменение физических основ процесса. При рассмотрении критериев подобия было рассмотрено влияние исходных параметров на структуру и свойства высушиваемых материалов. Взят во внимание количественное содержание газовой фазы в системе и значение ее теплопроводности можно поставить под сомнение адекватность получаемых значений. В результате проведенных литературных обзоров было получено выражение учитывающее соотношение всех трех фаз. Для подтверждения полученного выражения были проведены экспериментальные исследования определения коэффициента теплопроводности исследуемой смеси. Использование полученных зависимостей характеристик позволяет частично раскрыть механизм аномально высокой теплопроводности у влажных материалов.

**Ключевые слова:** дисперсионная среда, гранулирование, сушка, гранулы, фазовые характеристики**CHANGING THE PHASE CHARACTERISTICS OF WET DISPERSIONS****Popov A.M., Donya D.V., Kravchenko S.N., Plotnikova I.O., Plotnikov K.B., Khlopotov I.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 the study of structural changes in the phase characteristics of disperse systems, depending on their thermal properties. When considering the structural characteristics between different phases using different similarity criteria it can be concluded that the most common method of evaluation of the proportion between the phases is a weight. This method does not provide a complete picture of the processes occurring during the drying process, since the consideration of the specific content of components in the system are not taken into account the gas phase, but it can have a significant impact on the change in the physical foundations of the process. When considering the similarity criteria were considered, depending on the initial parameters of the structure and properties of materials to listen to. Taking into account the quantitative content of the gas phase in the system and its thermal conductivity value can be put into question the adequacy of the obtained values. The result of the conducted literature reviews which takes into account the ratio of the expression of all three phases was obtained. To confirm the expression obtained experimental studies determining the thermal conductivity of the test mixture were conducted. Using the resulting characteristics of dependencies allows partially revealing the mechanism of anomalously high thermal conductivity in wet materials.

**Keywords:** dispersion medium, granulation, drying, granules, phase characteristics

Сушкой называется термический процесс удаления из твердых материалов или дисперсных систем содержащейся в них влаги путем ее испарения. В процессе удаления влаги из материала конечный продукт приобретает новые свойства, которые предохраняют его от гниения и плесени, увеличивают его долговечность, предотвращают сжатие, искривление и растрескивание, также у него уменьшается масса, что ведет к удешевлению транспортировки. Меняются физические свойства материала, например снижается теплопроводность [6]. Коэффициент теплопроводности влажных материалов, согласно экспериментальным данным многочисленных исследований, значительно выше,

чем коэффициент теплопроводности сухих тел. Его увеличение, согласно гипотезе А.В. Лыкова, объясняется тем, что испарение влаги происходит не только внутри или на поверхности сушеного тела, но и в небольшом пространстве над поверхностью объекта, куда выносятся микроскопические капли влаги, увлекаемые потоком сушильного агента с поверхности тела. Существующие на данный момент полуэмпирические и эмпирические зависимости позволяют рассчитывать эти коэффициенты теплопроводности. Однако определение общей продолжительности сушки до требуемого конечного влагосодержания материала, возможно лишь при известных закономерностях кинетики процесса.

**Цель работы:** определение фазовых характеристик влажных дисперсных систем.

**Материалы и методы исследования**

Объектом исследования является поведение влажных материалов во время процесса сушки при различных условиях, а также возможность его прогнозирования во времени с помощью критериев трещинообразования и коэффициентов чувствительности к сушке. На основе баланса масс между фазами, составляющими систему, производится расчет этих коэффициентов, при этом используется весовое влажосодержание.

При сушке свобододисперсных систем использовались: сахар, крахмал и влажный шрот ягоды. Баланса массы каждого из компонентов будет достаточно для прогнозирования процесса сушки. При сушке связнодисперсных материалов, у которых известны форма и размеры используется не только баланс масс, но и баланс объемов [8]. Сумму объемных концентраций каждой из фаз для наглядности можно представить в виде выражения [2]:

$$K_r + K_t + K_{ж} = 1, \tag{1}$$

где  $K_r$ ,  $K_t$ ,  $K_{ж}$  – соответственно содержание газовой, твердой и жидкой фазы.

Формула (1) справедлива в процессе всего времени сушки. При полном удалении влаги из высушиваемого материала уравнение (1) примет вид [2]:

$$K_r + K_t = 1. \tag{2}$$

Использование фазовых характеристик позволяет оценить качество высушенных продуктов, а также эффективность процесса сушки. Объемные концентрации твердой фазы позволяют определить эффективность процесса сушки не только в статике, но и в динамике. Для расчетов и исследований процесса сушки используются материальный и тепловой балансы и *i-d* диаграмма Л.К. Рамзина [1, 3]. По данной методике можно определить необходимую температуру сушильного агента, а также рассчитать влагосодержание материала в процессе высушивания. При сушке материалов заданной формы необходимо помнить, что нужно следить не только за параметрами сушильного агента, но и за геометрическими характеристиками высушиваемого изделия, что зачастую сложно осуществить, если при этом используются параметры влагосодержания материала. Поэтому обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что использование объемных характеристик позволит сократить погрешность измерений.

Показатель количества жидкого компонента в системе позволяет определить размер образовавшейся кристаллизационной структуры, а свойства твердой фазы при этом не оказывают влияния на зависимость  $K_t$  и влагосодержание материала при  $W \geq W_{нкв}$  ( $W$  – влажность материала;  $W_{нкв}$  – наименьшая капиллярная влажность) [2]:

$$K_t = b \cdot W + a, \tag{3}$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, полученные эмпирическим путем.

Для того чтобы определить изменение свойств материала во время сушки, необходимо рассмотреть различие между приготовлением формовочной массы и сушкой. При этом необходимо рассматривать этот процесс, используя упрощенное представление о со-

ставе и структуре двухкомпонентных систем – структурного каркаса и парового вещества. Основная часть влаги может быть связана только поровым веществом, которое представляет из себя мелкодисперсные частицы, образующие с жидкостью суспензию. Грубодисперсные частицы суспензии образуют каркас формовочной массы и не могут удерживать большого количества влаги [4, 5].

Согласно классической технологии производства быстрорастворимых напитков после процесса грануляции, гранулы подвергаются сушке, во время которой происходит нагрев поровой суспензии [7, 9]. Для определения влияния температуры на реологические свойства паровой суспензии были проведены серии опытов. В качестве объекта исследования была принята суспензия 40% сока аронии, шрота ягоды и крахмала. Исследуемые модельные объекты нагревались до температуры от 20 до 50 °С с шагом в 10 °С, после этого производилось термостатирование. Вследствие высокого коагуляционного структурирования исследуемых проб, время и условия подготовки опытных проб суспензии строго регламентировались и были постоянными. Результаты приведены в табл. 1 ( $\psi$  – скорость сдвига;  $Q$  – предел упругости;  $\eta$  – внутреннее трение).

**Таблица 1**

**Влияние температуры на реологические свойства суспензии**

Реологические параметры	Температура, °С			
	20	30	40	50
$Q$ , дин/см <sup>2</sup>	270	290	340	470
$\eta$ , пуаз	2,24	1,68	1,26	1,02
$\psi$ , сек <sup>-1</sup>	113	121	142	196

Из табл. 1 видно что при повышении температуры увеличивается предельное напряжение сдвига, это связано с интенсификацией коагуляционного структурообразования. Объем жидкой фазы в системе увеличивается, так как растворимость сахарозы с увеличением температуры возрастает на 25%, следовательно, пластичность при повышении температуры так же резко возрастает [3].

М.С. Белопольским было доказано, что чувствительность дисперсной массы к процессу сушки можно описать с помощью коэффициента образования поверхностных трещин в момент усадки поверхностного слоя и коэффициента образования внутренних трещин в период окончания усадки поверхностного слоя.

Математическое описание процесса сушки с помощью системы дифференциальных уравнений теплового переноса имеет ряд сложностей, в этой связи для описания процесса сушки используют критерии подобия тепломассопереноса, среди которых можно выделить следующие: Лыкова (Lu), Поснова (Pn), Кирпичева (Ki), Вино (Vi), Коссовича (Ko), Фурье (Fo), Ребиндера (Rb) [3].

Проведя анализ коэффициента теплопроводности можно сделать вывод, что его величина не зависит от массы материала, а теплопроводность можно рассчитать также по правилу аддитивности. Согласно Киршеру коэффициент теплопроводности можно определять по следующему выражению [4]:

– при передаче тепла вдоль слоев

$$\lambda_{см} = (1 - \Pi) \lambda_t + \Pi \lambda_{ж}, \tag{4}$$

– при передаче тепла поперек слоев

$$\lambda_{см} = \frac{\lambda_r \cdot \lambda_{ж}}{[(1-\Pi)\lambda_r + \Pi\lambda_{ж}]}, \quad (5)$$

где  $\Pi$  – пористость слоя материала;

$\lambda_r, \lambda_{ж}, \lambda_{см}$  – коэффициенты теплопроводности твердой, жидкой фаз и их смеси.

В результате литературного обзора было выявлено большое количество различных зависимостей для определения коэффициента теплопроводности влажных дисперсных материалов, но в этих зависимостях не учитывается объемный фазовый состав. Зависимости являются эмпирическими и имеют узкий круг применения. Поэтому формула, предложенная Киршером, обладает преимуществом, т.к. учитывает объемное содержание жидкой и твердой фазы, но в этой формуле не учитывается объемное содержание газовой фазы, имеющей хоть и небольшую массу в системе, имея небольшую плотность и теплопроводность, она может оказывать существенное влияние на процесс сушки. Учитывая все вышесказанное, формула для расчета коэффициента теплопроводности дисперсных материалов будет иметь вид

$$\lambda_{вл} = \frac{(K_r + K_{ж}) / (1 - K_r)}{\frac{K_r \cdot \alpha_1}{\lambda_{r1}} + \frac{K_r \cdot \alpha_2}{\lambda_{r2}} + \frac{K_{r3} \cdot \alpha}{\lambda_{r3}} + \frac{K_{ж}}{\lambda_{ж}} + \frac{K_r}{\lambda_r}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_r, \lambda_{ж}, \lambda_r, \lambda_{вл}$  – коэффициенты теплопроводности твердой, жидкой, газовой фаз и дисперсного материала;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коэффициенты объемной концентрации составляющих твердой фазы;

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1. \quad (7)$$

Выражение в числителе формулы (6) учитывает соотношение всех трех фаз и при  $K_{ж} = 0$  трансформируется в соотношение твердой и газовой фаз.

Для подтверждения адекватности полученной формулы были проведены серии экспериментов для определения коэффициента теплопроводности на модельной смеси, имеющей состав: сахар – 60%; крахмал – 25%; шрот аронии – 15%; премиксы 0,01 (сверх 100%). Результаты сведены в табл. 2.

Коэффициент теплопроводности у сухих монокристаллических образцов размерами 50x50x75 мм определялся методом постоянного плоского источника тепла. Образцы были изготовлены с помощью метода пластичного формования, влажность составляла 15%, давление прессования 50 МПа. После прессования образцы подвергались сушке в сушильном шкафу при температуре 60 °С. Температура поддерживалась постоянной в течение всего процесса, после высушивания образцы охлаждались в эксикаторе до температуры 20 °С в течение 24 часов. Коэффициент теплопроводности смеси определялся экспериментальным путем и составлял в среднем 0,696 Вт/м·град. По формулам (4), (5) были рассчитаны коэффициенты теплопроводности и теплоемкости смеси во влажном состоянии. Данные для этих расчетов принимались согласно значениям, полученным расчетно-экспериментальным путем во время предварительных исследований. Влагопроводность смеси рассчитывалась по коэффициенту капиллярной пропитки  $K_{кп}$  (м<sup>2</sup>/с) по следующему выражению:

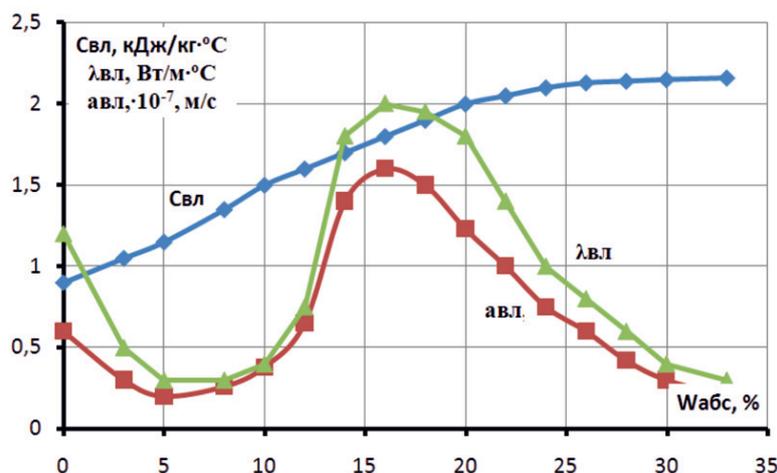
$$W = 0,344 \cdot 10^6 K_{кп} + 0,142, \quad (8)$$

$$K_r = -0,52 \cdot K_{кп} + 0,74. \quad (9)$$

Таблица 2

Теплофизические свойства влажной смеси

$W_{абс}$	$\rho_{вл}, \text{кг/м}^3$	$\rho_{сух}, \text{кг/м}^3$	$K_r$	$K_{ж}$	$K_r$	$\lambda_{вл}, \text{Вт/м} \cdot \text{град}$	$c_{вл}, \text{КДж/кг} \cdot \text{град}$	$a_{вл} \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$K_{кп} \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Lu
0,051	1235	1156	0,630	0,079	0,290	0,140	1,150	0,206	–	–
0,082	1336	1205	0,650	0,131	0,220	0,208	1,313	0,253	–	–
0,100	1474	1304	0,690	0,170	0,140	0,376	1,510	0,369	–	–
0,121	1587	1373	0,718	0,214	0,068	0,758	1,566	0,676	–	–
0,142	1687	1328	0,740	0,260	–	1,883	1,709	1,466	0,000	0,00
0,158	1647	1368	0,716	0,279	0,005	2,028	1,774	1,550	0,046	0,30
0,181	1612	1304	0,690	0,308	0,002	1,999	1,870	1,475	0,113	0,76
0,198	1576	1250	0,670	0,327	0,003	1,822	1,934	1,324	0,162	1,22
0,218	1536	1190	0,644	0,347	0,009	1,453	2,002	1,041	0,221	2,12
0,236	1491	1130	0,620	0,361	0,019	1,102	2,051	0,789	0,273	3,46
0,252	1445	1074	0,597	0,372	0,031	0,844	2,090	0,607	0,319	5,25
0,275	1378	995	0,565	0,383	0,052	0,582	2,130	0,426	0,386	9,06
0,297	1306	916	0,533	0,391	0,076	0,415	2,161	0,312	0,450	14,42
0,319	1258	857	0,509	0,401	0,090	0,346	2,196	0,263	0,514	19,54
0,335	1182	785	0,480	0,397	0,123	0,249	2,188	0,200	0,561	28,05



Теплофизические свойства материала в зависимости от его влагосодержания

### Результаты исследования и их обсуждение

Согласно полученным данным (табл. 2) при влажности  $W_{нкв} = 0,142$ , коэффициент капиллярной пропитки равен нулю, данную влагу, возможно, удалить во время термического обезвоживания, поэтому критерий Лыкова может быть определен при условии  $W > W_{нкв}$ , т.е. когда образуется капиллярно подвижная влага. При влажности 19% обеспечивается равновесная скорость изотермической и изоконцентрационной поверхностей. При влажности  $W > 0,19$  коэффициент Лыкова равен  $Lu > 1$ . Этот процесс сушки наиболее опасен, так как сушка материала будет идти с постоянной скоростью, а скорость диффузии влаги будет превышать скорость диффузии тепла. Поэтому при перемещении капиллярно-подвижной влаги температура в центре гранулы будет ниже температуры сушильного агента. После окончания процесса перемещения и удаления капиллярно-подвижной влаги температура материала будет повышаться, так как будет происходить углубленное испарение, то есть в процессе начинает преобладать теплопроводность.

Согласно рисунку теплоемкость исследуемой смеси увеличивается до оптимальной формовочной влажности  $W = 0,24$ . При влажности 0,24–0,335 теплоемкость смеси практически не изменяется, несмотря на изменение фаз системы. Это объясняется тем, что увеличение влагосодержания материала происходит более интенсивно за счет изменения объемной концентрации жидкой фазы по сравнению с объемной концентрацией твердой фазы в связи с су-

щественным различием плотностей этих двух фаз. Из графика видно, что при высокой влажности гранулы имеют высокое термическое сопротивление, но при достижении влажности 10–12% происходит резкое возростание теплопроводности. При этом коэффициент теплопроводности для данной влажности превышает  $\lambda$  для всех фаз, из которых состоит материал. Это связано с высокой теплопроводностью влажных материалов.

### Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что для совершенствования методики определения теплофизических характеристик дисперсных систем необходимо использовать фазовые объемные характеристики, что в конечном итоге позволит повысить достоверность полученных результатов. Использование этих характеристик может позволить более подробно понять механизм аномально высокой теплопроводности влажных материалов и в дальнейшем прогнозировать не только изменения теплофизических свойств, но и поведение материалов во время проведения процесса при различных значениях содержания фаз.

### Список литературы

1. Бакластов А.М. Промышленные теплообменные процессы и установки / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.; Под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
2. Лотов В.А. Изменение фазового состава системы цемент-вода при гидратации и твердении / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2012. – Т. 321, № 3. – С. 42–45.

3. Лыков А.В. Прогноз развития науки о сушке капиллярно-пористых коллоидных тел. / А.В. Лыков. – ИФЖ. – 1970. – № 4. – С. 609–616.

4. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

5. Макковеев М.А. Идентификация процесса гранулирования инстантированных полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором / М.А. Макковеев, А.М. Попов, Е.Б. Асташенко, А.В. Чупин. – Техника и технология пищевых производств, 2010. – № 2. – С. 60–65.

6. Сорокопуд В.В. Теплофизические характеристики водных и водно-спиртовых экстрактов ягод клюквы и голубики / В.В. Сорокопуд, И.Б. Плотников, Л.В. Плотникова. Химия растительного сырья. – 2014. – № 3. – С. 255–258.

7. Chokshi R., Zia H. Hot melt extrusion technique: a review, Iranian J Pharm Res. – 2004. – № 3. – P. 3–16.

8. Popov A. Systemic Regularities in the Study and Design of Technological Complexes for the Production of Instant Beverages / Popov A. // Food and Raw Materials. – 2014. – № 2. – P. 156–160.

9. Rundgren K., Lyckfeldt O. and Sjöstedt M., Improving Powders with Freeze Granulation, Ceramic Industry, 2003. – P. 40–44.

### References

1. Baklastov A.M. Promyshlennye teplomassoobmennye processy i ustanovki / A.M. Baklastov, V.A. Gorbenco, O.L. Da-

nilov i dr.; Pod red. A.M. Baklastova. M.: Jenergoatomizdat, 1986. 328 p.

2. Lotov V.A. Izmenenie fazovogo sostava sistemy cement-voda pri gidratacii i tverdenii / Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2012. T. 321, no. 3. pp. 42–45.

3. Lykov A.V. Prognoz razvitiya nauki o sushke kapilljarno-poristykh kolloidnykh tel. / A.V. Lykov. IFZh. 1970. no. 4. pp. 609–616.

4. Lykov A.V. Teorija sushki / A.V. Lykov. M.: Jenergiya, 1968. 472 p.

5. Makkoveev M.A. Identifikacija processa granulirovaniya instantirovannykh polidispersnykh produktov v tarelchatykh granuljatorah s aktivatorom / M.A. Makkoveev, A.M. Popov, E.B. Astashenko, A.V. Chupin. Tehnika i tehnologija pishhevyykh proizvodstv, 2010. no. 2. pp. 60–65.

6. Sorokopud V.V. Teplofizicheskie harakteristiki vodnykh i vodno-spirovovykh jekstraktov jagod kljukvy i golubiki / V.V. Sorokopud, I.B. Plotnikov, L.V. Plotnikova. Himija rastitelnogo syrja. 2014. no. 3. pp. 255–258.

7. Chokshi R., Zia H. Hot melt extrusion technique: a review, Iranian J Pharm Res. 2004. no. 3. pp. 3–16.

8. Popov A. Systemic Regularities in the Study and Design of Technological Complexes for the Production of Instant Beverages / Popov A. // Food and Raw Materials. 2014. no. 2. pp. 156–160.

9. Rundgren K., Lyckfeldt O. and Sjöstedt M., Improving Powders with Freeze Granulation, Ceramic Industry, 2003. pp. 40–44.