

УДК 66.047

Турчина Т.Я.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ КАПЕЛЬ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ – СОЛОДОВЫХ ЭКСТРАКТОВ

Наведено аналіз кінетичних характеристик процесів теплово-логопереносу при сушінні крапель (часток) солодових екстрактів.

Представлен анализ кинетических характеристик процессов теплово-лагопереноса при сушке капель (частиц) солодовых экстрактов.

Analysis kinetics characteristics of heat moisture transfer during drying of malt extracts droplets (particles) are represented.

b – температурный коэффициент сушки;
 C – концентрация сухих веществ;
 c – удельная теплоемкость влажного материала;
 m – масса;
 T – температура;
 u – влагосодержание;
 τ – время;
 δ – размер капли;
 кр.1 (2, 3) – первая (вторая, третья) критическая точка.

Индексы нижние:

v – воздух;
 vx – вход;
 $вых$ – выход;
 зав – завершающий;
 k – капля;
 кон – конечный;
 м.т. – мокрый термометр;
 o – исходный, начальный;
 общ – общий;
 пор – порошок;
 ст – стенка.

Введение

Сушка распылением многокомпонентных систем на растительной основе, включающих термолабильные биологически активные вещества [1–4], осложнена такими их свойствами, как:

– адгезионность частиц при соприкосновении с горячими поверхностями, обусловленная низкой температурой размягчения сахаров, органических кислот и др. [1–6],

– гигроскопичность и повышенная сорбционная способность дисперсного порошка [2, 5, 7],

– малая диффузионная способность (в отличие от чистых однокомпонентных растворов неорганических веществ) [4, 8].

Таковыми сложными объектами сушки распылением являются солодовые экстракты [9]. Наряду с богатым аминокислотным, белковым и минеральным составом все же основную часть (более 80 % общей массы сухих веществ) этих продуктов составляют полисахариды, в т.ч.

мальтоза, глюкоза, фруктоза, декстрины и др., которые определяют их принадлежность к биополимерам и которым характерны названные выше свойства, осложняющие процесс распылительной сушки.

Ввиду все возрастающего спроса на многофункциональные пищевые добавки из натурального растительного сырья, к которым относятся и солодовые экстракты, выполняющие одновременно ряд функций, например, при изготовлении хлебо-булочных, кондитерских изделий (заменители сахара, разрыхлители, красители, обогащение биологически активными веществами иммунологического свойства [5, 10, 11]), освоение их производства в сыпучей порошкообразной форме является актуальным.

Цель данной работы заключалась в анализе влияния температурных параметров на кинетические характеристики процессов теплово-лагопереноса при сушке капель ячменно-солодового экстракта (далее по тексту ЯСЭ) различного

начального содержания сухих веществ, в определении наиболее рациональных температурных режимов процесса распылительной сушки.

Кинетические характеристики процессов тепло- и влагопереноса при сушке капель ЯСЭ

Особенности технологии получения порошков солодовых экстрактов и влияние температурных режимов сушки на эффективность работы экспериментальной распылительной сушилки с камерой диаметром 1,3 м, оснащенной центробежным дисковым распылителем, на адгезионные явления в камере и выход порошка были изложены ранее [4, 5]. В данной работе представлен анализ кинетических характеристик процессов тепло- и влагопереноса при сушке капель ЯСЭ с содержанием сухих веществ $C_0 = 25, 35, 45 \%$ при $T_B = 160, 180 \text{ }^\circ\text{C}$, полученных при обработке экспериментальных термо- ($T_k(\tau)$) и массограмм ($m(\tau)$) [5].

На рис. 1 представлены графические зависимости изменения во времени температуры капли T_k , интенсивности влагопереноса dm/dt и влагосодержания u при сушке капель ЯСЭ для вышеуказанных значений C_0 при температуре воздуха $T_B = 160 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Совместный анализ графических зависимостей (рис.1) показал следующее. Для значений $C_0 = 25$ и 35% (а, б) на термограммах до точки кр.1 испарение влаги происходит при температуре капли, близкой к температуре мокрого термометра ($46...55 \text{ }^\circ\text{C}$), которая несколько повышается с повышением концентрации растворенного вещества в поверхностном слое.

Установлено, что увеличение содержания сухих веществ с 25% до 45% приводит к сокращению периода испарения влаги со свободной поверхности капли, при этом относительное время $\tau_{кр.1}/\tau_{общ}$ оценивалось по продолжительности постоянного значения dm/dt в этом периоде.

Для капель ЯСЭ с $C_0 = 45 \%$ (рис. 1, в) процесс сушки протекает практически с самого начала при значительном росте T_k и потому можно считать, что процесс сушки состоит из

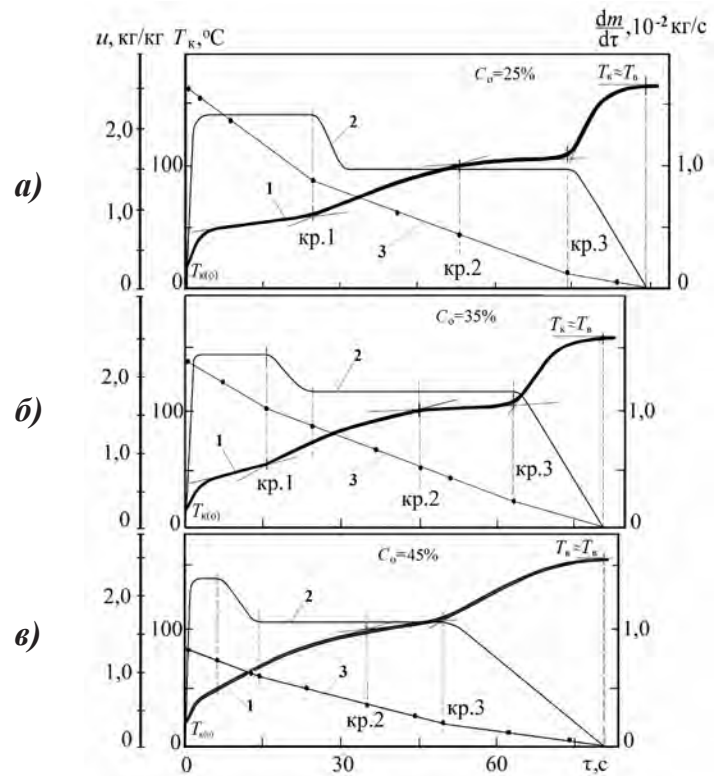


Рис. 1. Зависимости $T_k(\tau)$ (1), $dm/dt(\tau)$ (2) и $u(\tau)$ (3) при сушке капель ЯСЭ с C_0 : а) 25 %, б) 35 %, в) 45 %; $T_B = 160 \text{ }^\circ\text{C}$.

трех стадий: коркообразования, кипения и досушки. Как видно из рис. 1, в этот период является продолжением периода прогрева капли от начальной температуры $T_{k(0)}$ до температуры капли (в некоторой условно обозначенной точке (кр.1)) $T_{k(кр.1)} \approx 65 \text{ }^\circ\text{C}$, до которой скорость изменения температуры капли является величиной постоянной $dT_k/dt \approx const$. Сразу за кратковременным прогревом наблюдается увеличением температуры капли до температуры кипения растворителя (воды) при $T_k = T_{k,кип} \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ (точка кр.2). Как видно из рис. 1, на отрезке кривой $T_k(\tau)$ от первой критической точки кр.1 до точки кр.3 отмечается общий характер изменения температуры капель ЯСЭ и значительное влияние исходного содержания сухих веществ на длительность заключительного периода – периода

Табл. 1. Кинетические характеристики процесса сушки капель ЯСЭ при $T_B = 160^\circ\text{C}$

Параметр		$C_o, \% (u_o, \text{мг/мг})$		
		25 (3,0)	35 (1,86)	45 (1,22)
u/u_o	кр.1	0,58	0,76	0,73
	кр.2	0,28	0,35	0,45
	кр.3	0,17	0,20	0,25
$(dm/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}}$		0,72	0,76	0,78
$(dm/d\tau)_{\text{кр.1}}$				
$(du/d\tau)_{\text{кр.1}}, \text{кг/кг/с}$		0,044	0,040	0,030
$(du/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}}, \text{кг/кг/с}$		0,023	0,021	0,018
$(du/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}}$		0,52	0,53	0,60
$(du/d\tau)_{\text{кр.1}}$				
$dT_K/du, ^\circ\text{C/кг/кг}$		~ 63		80

падающей скорости сушки. Так, если при $C_o = 25\%$ значение относительного времени периода досушки к общему времени сушильной стадии сушки составляет $\sim 0,23$, то для $C_o = 45\%$ это значение увеличивается до $\sim 0,40$.

Период кипения для $C_o = 25$ и 35% (рис. 1, а, б) характеризуется перегибами на термограмме в критических точках кр.2 и кр.3 и протекает по линейной зависимости при практически постоянной температуре капли $T_K = T_{\text{кип}} = \text{const}$ и составляет $\sim 0,33$ общей длительности сушильного периода. При $C_o = 45\%$ (рис. 1, в) такие перегибы на термограммах менее выражены, а продолжительность периода кипения сокращается до $0,20$.

Относительное время сушки капель ЯСЭ до критических точек кр.2 и кр.3 ($\tau_{\text{кр.2}}/\tau_{\text{общ}}$ и $\tau_{\text{кр.3}}/\tau_{\text{общ}}$) в большей степени зависит от содержания сухих веществ в исходном продукте. По результатам расчетов относительное время сушки капель ЯСЭ (45%) до третьей критической точки ($\tau_{\text{кр.3}}/\tau_{\text{общ}}$) сокращается по

сравнению с каплями ЯСЭ (25%) на $\sim 25\%$.

Установлено, что при сушке капель ЯСЭ при $T_B = 160^\circ\text{C}$ значения отношения интенсивностей массопереноса в периоде коркообразования (после кр.1) к интенсивности в испарительном периоде (до кр.1) $(dm/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}} / (dm/d\tau)_{\text{кр.1}}$ мало отличаются ($0,72 \dots 0,78$) (табл. 1).

Характерной особенностью изменения влагосодержания в каплях ЯСЭ в процессе сушки является их линейная зависимость от времени на каждом из рассмотренных отрезков кривой $u(\tau)$ (рис. 1). Скорость изменения влагосодержания (скорость сушки) $du/d\tau$ (табл. 1) в высокотемпературной стадии сушки мало зависит от исходной концентрации сухих веществ, при этом относительная величина $(du/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}} / (du/d\tau)_{\text{кр.1}}$ несколько увеличивается (табл. 1).

Относительные значения влагосодержаний u/u_o в критических точках кр.1, кр.2, кр.3 (табл. 1) показали, что при исследуемых значениях T_B содержание сухих веществ в исходном

продукте способствует их увеличению, что указывает на снижение диффузионной способности образующейся оболочки из растворенных веществ на поверхности высушиваемой капли.

На рис. 2 представлены графические зависимости изменения температуры капли $T_k(\tau)$, интенсивности массопереноса $dm/d\tau(\tau)$ и влагосодержания $u(\tau)$ от времени при сушке каплей ЯСЭ при температуре воздуха $T_B = 180^\circ\text{C}$.

Как видно из рис. 2, при температуре воздуха 180°C отмечается в общем идентичный с рассмотренными выше кривыми (рис. 1) характер изменения температуры капли в процессе сушки. Повышение интенсивности процессов при повышении T_B обуславливает сокращение как периода испарения со свободной поверхности (рис. 2, а, б), так и отдельных периодов в высокотемпературной стадии сушки (коркообразования и кипения). Увеличение температуры сушки на 20°C (со 160 до 180°C) способствует сокращению общего времени сушки каплей ЯСЭ для всех исследованных концентраций сухих веществ на $\sim 20\text{--}25\%$. Установлено, что при общем повышении интенсивности процессов тепло- и массопереноса повышение температурного режима сушки практически не влияет на значения отношения $(dm/d\tau)_{\text{кр.1--кр.3}} / (dm/d\tau)_{\text{кр.1}}$ и они находятся в том же диапазоне величин, что и при $T_B = 160^\circ\text{C}$ (табл. 1, 2).

Для кривых $u(\tau)$ (рис. 2) характерным является линейная зависимость изменения влагосодержания каплей ЯСЭ от времени сушки до третьей критической точки (кр.3), при этом значения скорости влагопереноса для $C_0 = 35\text{--}45\%$ оказались близкими величинами (рис. 2, б, в) для обеих стадий сушки (до и после точки кр.1) (табл. 2).

Как показали визуальные наблюдения и данные начальных и конечных размеров каплей (частиц) ЯСЭ при сушке [5], для такого продукта характерно многократное раздувание частиц в периоде кипения с резким изменением их размеров в большом диапазоне вплоть до точки кр.3, что способствует увеличению площади поверхности и интенсификации процесса вла-

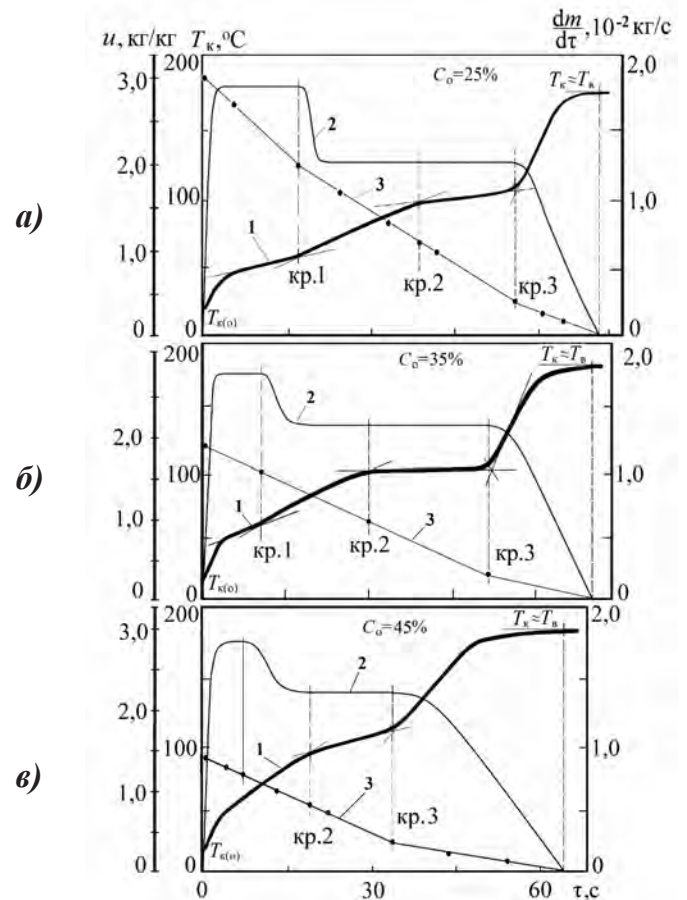


Рис. 2. Зависимости $T_k(\tau)$ (1), $dm/d\tau(\tau)$ (2) и $u(\tau)$ (3) при сушке каплей ЯСЭ с C_0 : а) 25 %, б) 35 %, в) 45 %; $T_B = 180^\circ\text{C}$.

гообмена. После точки кр.3 процесс раздувания идет на убыль, но размеры высушенных частиц остаются больше начальных ($\delta_{\text{кон}} > \delta_0$) [5].

На основании полученных результатов установлено, что при сушке каплей ЯСЭ для концентраций сухих веществ $C_0 = 25$ и 35% процесс протекает при близких значениях температурного коэффициента сушки $b = dT_k/du$, а для $C_0 = 45\%$ – при более высоких его значениях (табл. 1, 2).

На основе полученных данных исследований тепломассообменных характеристик процесса сушки каплей ЯСЭ: относительных значений критических влагосодержаний $(u/u_0)_{\text{кр.1}}$, $(u/u_0)_{\text{кр.2}}$, $(u/u_0)_{\text{кр.3}}$, интенсивности массопе-

Табл. 2. Кинетические характеристики процесса сушки капле ЯСЭ при $T_B = 180$ °С

Параметр		$C_o, \% (u_o, \text{мг/мг})$		
		25 (3,0)	35 (1,86)	45 (1,22)
u/u_o	кр.1	0,67	0,82	0,83
	кр.2	0,37	0,53	0,53
	кр.3	0,14	0,16	0,29
$\frac{(dm/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}}}{(dm/d\tau)_{\text{кр.1}}}$		0,70	0,77	0,81
$(du/d\tau)_{\text{кр.1}}, \text{кг/кг/с}$		0,060	0,035	0,032
$(du/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}}, \text{кг/кг/с}$		0,040	0,033	0,031
$\frac{(du/d\tau)_{\text{кр.1-кр.3}}}{(du/d\tau)_{\text{кр.1}}}$		0,67	0,94	0,97
$dT_k/du, \text{°C/кг/кг}$		~ 72		80

реноса $dm_k/d\tau$, скорости сушки $du/d\tau$ и температурного коэффициента сушки $b = dT_k/du$ установлено, что повышение температурных параметров сушки капле ЯСЭ на 20 °С (со 160 до 180 °С) способствует увеличению интенсивности процессов влагопереноса в высокотемпературной стадии в 1,5...2,0 раза.

Следует отметить, что при сушке капле ЯСЭ с $C_o = 45$ % значительное снижение интенсивности влагопереноса в завершающем периоде – периоде досушки (после точки кр.3), обусловленное большим диффузионным сопротивлением процессу влагопереноса образовавшейся корочки на поверхности частицы, а также повышенным значением относительного влагосодержания в точке кр.3 (табл. 2), приводит к существенному увеличению его продолжительности (рис. 2). Это позволяет утверждать, что дальнейшее увеличение концентрации сухих веществ в экстракте, подаваемом в распылительную сушилку, нецелесообразно.

Из приведенных графиков видно, что в завершающем периоде сушки – после точки кр.3 – интенсивность влагопереноса $(du/d\tau)_{\text{зав}}$ в 2...3 раза ниже (в 3 раза – для $C_o = 45$ % при $T_B = 180$ °С), чем в предыдущих периодах, что может обуславливать повышенные адгезионные свойства частиц.

Термопластические и адгезионные свойства высушенных частиц ЯСЭ изучались с помощью кинокамеры методом визуальных наблюдений за изменениями формы и состояния частиц при соприкосновении с металлическим заостренным щупом в потоке теплоносителя при постоянной его температуре (160 и 180 °С) и за пределами потока теплоносителя – при температуре частицы, охлажденной до температуры окружающей среды.

Исследования показали, что в диапазоне концентраций сухих веществ в экстракте $C_o = 25...45$ % высушенные частицы в потоке теплоносителя находятся в пластичном состоя-

нии. При соприкосновении с щупом частицы склонны к деформации. Выведение щупа из частиц сопровождается нарушением целостности частиц и отрывом части продукта, прилипшего к щупу.

Иная картина наблюдалась при выведении высушенных частиц за пределы потока высокотемпературного теплоносителя в среду воздуха с $T_{\text{в}} = 20...40$ °С. В результате охлаждения происходило отвердевание частиц. При соприкосновении с щупом частицы на спае оставались неподвижными, форма их не изменялась, проткнуть их не удавалось: щуп скользил по их поверхности.

На основании полученных результатов можно утверждать, что если невозможно использовать структурирующие белковосодержащие добавки (типа СОМ), улучшающие условия высушивания и снижающие адгезионные свойства частиц порошка ЯСЭ, то процесс распылительной сушки солодовых экстрактов следует проводить с обязательной организацией охлаждения высушенного порошка на выходе из распылительной камеры следующим образом:

- 1 стадия охлаждения – во взвешенном состоянии – до 60...65 °С;
- 2 стадия охлаждения – при перемешивании (за пределами сушильной камеры в отдельном аппарате с кипящим, виброкипящим слоем либо шнекового типа) – до 35...40 °С.

Такой постепенный метод охлаждения порошка позволит избежать значительных температурных напряжений в массе высушенного продукта и конденсации влаги на поверхности частиц и тем самым избежать повышения адгезионной способности материала в камере и в узлах выгрузочного устройства распылительной сушилки.

Выводы

1. На основе экспериментальных данных определены значения основных кинетических характеристик процессов тепловлагопереноса при сушке капель ЯСЭ: скорости сушки в отдельных периодах, температурного коэффициента сушки, а также соотношений этих ве-

личин, обусловленных влиянием внутренних процессов тепловлагопереноса.

2. Установлено, что для сушки капель ЯСЭ с $C_0 = 45$ %, протекающей в высокотемпературной стадии, закономерны повышенные значения относительного влагосодержания в точке кр.3, что характерно для коллоидных растворов с малой диффузионной способностью и существенно увеличивает длительность заключительного периода досушки. Это указывает на нецелесообразность более высокой концентрации сухих веществ в подаваемом на сушку экстракте.

3. Обоснованы рациональные температурные параметры процесса сушки солодовых экстрактов в условиях распылительной сушильной установки:

- концентрация сухих веществ в ЯСЭ при подаче в сушилку – $C_0 \approx 42...45$ %;
- температура теплоносителя (воздуха) на входе в сушильную камеру – $T_{\text{вх}} \approx 180 \pm 5$ °С,
- температура теплоносителя на выходе из сушильной камеры – $T_{\text{вых}} \approx 90 \pm 3$ °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dolinsky A., Maletskaya K., Snezhkin Y.* Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods.– *Drying Technology.*– 2000.– V.18.– № 3.– P. 747–758.
2. *Долинский А.А., Малецкая К.Д., Шморгунов В.В.* Кинетика и технология сушки распылением. – К.: Наукова думка. – 1987. – 224 с.
3. *Хухенху Б., Куц П.С., Чижик К.Г. и др.* Некоторые свойства облепихового сока как объекта сушки// Тезисы докладов V межд. конф.: ИТМО, 2004.– Т.2.– С. 258–259.
4. *Малецька К.Д., Турчина Т.Я.* Вплив температурних режимів на ефективність процесу розпилювального сушіння солодових екстрактів./ Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2009.– Вип.35.– Т.2.– С.152–157.
5. *Малецькая К.Д., Заритовская А.Г., Турчина Т.Я.* Особенности технологии получения порошков солодовых экстрактов для обогащения хлебопродуктов. / Наукові праці ОДАХТ.–

Одесса, 2001.– №21.– С. 276–279.

6. *B. Adhikari, T. Howes, B.R. Bhandari, and V. Truong.* Characterization of the surface stickness of fructose-maltodextrin solution during drying.– *Drying Technology.* – 2003.– V. 21.– № 1.– P. 17–34.

7. *Долинский А.А., Иваницкий Г.К.* Оптимизация процессов распылительной сушки. – Киев: Наукова думка.– 1984.– 320 с.

8. *Воюцкий С.С.* Курс коллоидной химии. М.: Изд-во «Химия», 1964. – 574 с.

9. *Ємельянова Н.О., Гречко Н.Я., Кошова В.М., Суходол В.Х.* Технологія солодових екстрактів, концентратів квасного сусла і квасу / За ред. Н.О. Ємельянової. – К.: ІСДО, 1994. – 152 с.

10. *Лукьянова Е.М., Самборская Е.П., Гутман Л.Б., Закревський А.А и др.* Новые продукты диетического и лечебного питания для беременных женщин и детей. / Под ред. Е.М. Лукьяновой. – Киев : Наук. думка, 1991.– 144 с.

11. *Бакулина О.О.* Развитие пищевых технологий: использование растительных экстрактов// *Пищ. пром-ть.*, №5. – 2007. – С.32–33.

12. *ТУ У 18.193–94.* Зміна №4 – 1998. «Екстракти солодові і продукти на їх основі».

Получено 25.02.2010 г.