

ДИНАМИКА ОБЪЕМНОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ УСАДКИ ЯГОД ПРИ ПОТЕРЕ СТРУКТУРНОЙ ВЛАГИ

Шуляк В.А., Изотова Л.А.

Разработана методика определения текущего объема и площади поверхности объектов сушки по фотографическому изображению. Проведен компьютерный анализ полученных фотоизображений и оценка скорости изменения объема и поверхности объекта сушки при потере структурной влаги. Экспериментально определены текущий вес и изменение линейных размеров материала, как функция времени и влажности, а также проведена оценка напряженного состояния в процессе объемной и термоусадки для различных ягод. С практической точки зрения, проведенные исследования позволяют уточнить методику расчета сушилок, с учетом изменения площади поверхности испарения влаги и объемной усадки материала в процессе сушки.

Введение

Большинство продуктов растительного происхождения содержат от 60 до 88 % структурной влаги. При этом, сохранить и переработать продукты в течение всего года можно лишь высушив их до минимальных значений остаточной влажности. При сушке исходные сырьевые материалы теряют вес, за счет испарения преимущественно паров воды. Одновременно происходит изменение объема и площади поверхности высушиваемого материала. Это приводит, прежде всего, к падению скорости удаления влаги, за счет уменьшения площади поверхности и увеличения плотности покровных слоев. Кроме этого, изменяется плотность материала и растут внутренние напряжения в объеме материала.

С целью изучения процессов усадки в процессе сушки нами была создана экспериментальная установка (рис. 1) [1], включающая: сушильный шкаф 5, мерную чашу с навеской из ягод 2, помещенную в него и подвешенную к электронным весам «OHAUS» 1, помещенную в него и подвешенную к электронным весам «OHAUS» 1.

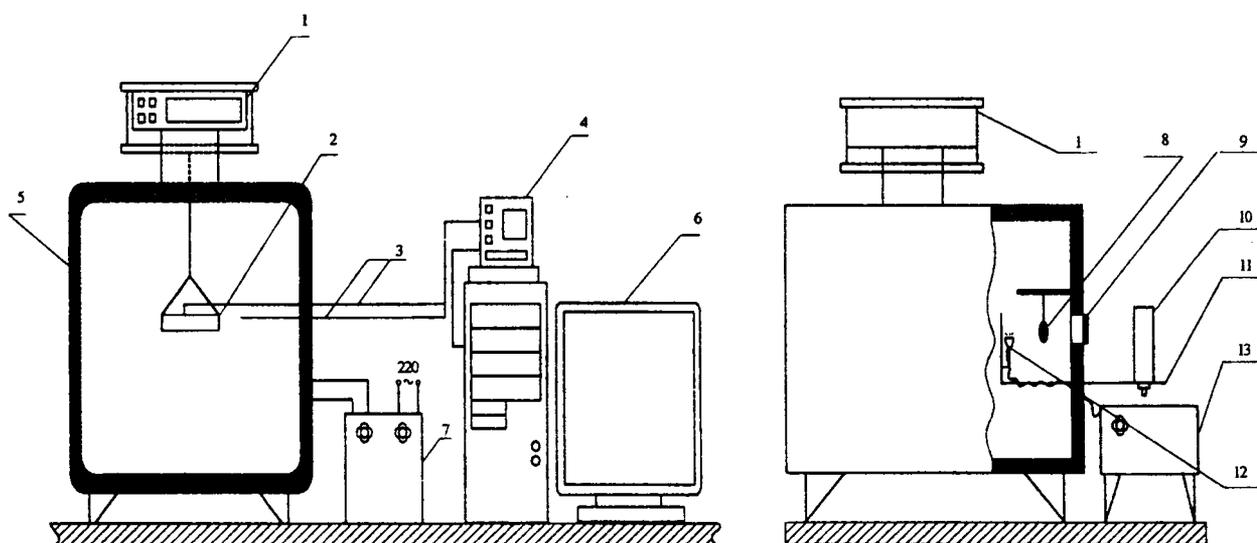


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Измерение температуры производится в двух точках с помощью термопар 3 марки ТХА-1199 завода «Энергоприбор». Для этого отделялась плодоножка ягоды и в полученное отверстие помещалась термопара приблизительно до середины ягоды». Обе они работают в комплекте с регистрирующим преобразователем-регулятором 4 – «Сосна-004», с цифровым индикатором.

Регулировка температуры в объеме сушильного шкафа 5 осуществлялась однофазным регулятором напряжения 7.

Определение степени усадки ягод осуществляли с помощью цифрового фотоаппарата 10 – «KONICA», закрепленного на держателе 11. Отдельно подвешенная ягода 8 фотографируется через линзу 9, вмонтированную в корпус сушильного шкафа 5 (рис. 2).

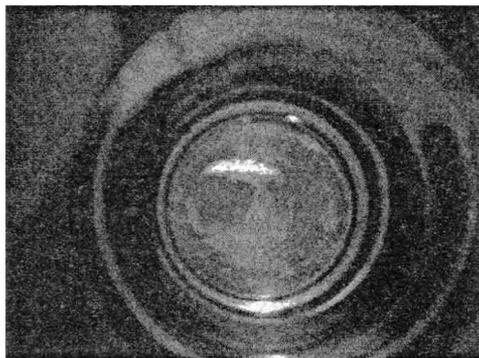


Рис. 2. Фотографическое изображение отдельной ягоды

Так как сушильный шкаф герметично закрыт и свет не проникает внутрь, то для обеспечения равномерного освещения подвешенной ягоды на держателе закрепляется лампа накаливания 12, регулировка интенсивности освещения которой, выполняется с помощью ручки выпрямителя 13. Все текущие данные выводились на монитор компьютера 6 и записывались в его память для последующего анализа.

Для обеспечения более высокой точности эксперимента с помощью электронного анализатора влажности «Sartorius MA 45» измеряется начальная влажность ягод и равновесная – для уже высушенных. Причем начальная влажность измерялась с помощью этого прибора для сопоставления расчетных и экспериментальных значений влажности и полученное значение использовалось как контрольный параметр, а по значению конечной влажности проводилось уточнение экспериментальных значений и в том числе значения массы абсолютно сухой ягоды. Температура, при которой работает анализатор влажности – 140 °С.

Начальные размеры подвешиваемой ягоды измеряются с помощью микрометра. Если форма ягоды максимально приближена к сферической, то находится средний ее диаметр путем проведения нескольких замеров. Если же у ягоды иная форма, то снимается 4-5 характерных для данной формы размеров (высота, максимальный и средний диаметр и т.д.). Все они заносятся в журнал наблюдений и учитываются при обработке результатов экспериментов.

При обработке фотографий каждое изображение преобразуется в монохромное (рис. 3), в котором ягода представлена в виде совокупности черных точек, а фон – белых. Это осуществляется в программном комплексе «Adobe Photoshop 7.0» следующим образом: вначале контур ягоды выделяется с помощью опции Magic Wand Tool, а затем автоматически заполняется черным цветом, а фон – белым. Все световые блики и другие дефекты, возникающие в процессе фотографирования, удаляются с помощью программного комплекса «Adobe Photoshop 7.0». После этого изображение преобразовывается в формат точечного рисунка и открывается с помощью специальной программы «Atea», созданной в среде «Delphi 7» [2], которая осуществляет подсчет количества пикселей черного цвета в каждой строке изображе-

ния. Высота и ширина одного пикселя H равнялась 0,05 мм. Объект сканировался сверху вниз, при этом форма и линейные размеры оценивались с точностью в один пиксель.

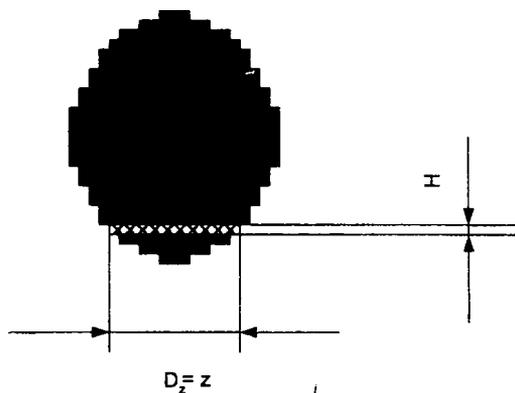


Рис. 3. Монохромное фотографическое изображение ягоды

Полученные экспериментальные данные о величинах основных геометрических параметров ягод позволили исследовать характер изменения темпа объемной и поверхностной усадки, динамику изменения величины относительной усадки. На рисунке 4 представлены кривые зависимости скорости объемной и поверхностной усадки от приведенной влажности, построенные в координатах $(dV/dt; W_{np})$ и $(dS/dt; W_{np})$ соответственно.

$$W_{np} = \frac{W_n - W_\tau}{W_n - W_p}, \quad (1)$$

где W_{np} – приведенная влажность ягоды в момент времени \square ;

W_n – начальная влажность ягоды, %;

W_τ – текущая влажность в момент времени \square , %;

W_p – равновесная влажность ягоды, %.

Значения текущей влажности определялись согласно стандартной методике [3].

Эти кривые хорошо описывается экспоненциально-степенной функцией вида [4]

$$W_{np} = \exp(-A \cdot (D_i(t))^N), \quad (2)$$

где $D_1(t) = dV/dt$ или $D_2(t) = dS/dt$ – скорость объемной, $\text{см}^3/\text{мин}$ и поверхностной усадки, $\text{см}^2/\text{мин}$;

A и N – эмпирические константы.

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 4, можно описать уравнением вида (3), полученного после несложных преобразований выражения (2)

$$D_i(t) = \sqrt[N]{-\frac{1}{A} \cdot \ln\left(\frac{W_n - W_p}{W_n - W_\tau}\right)}. \quad (3)$$

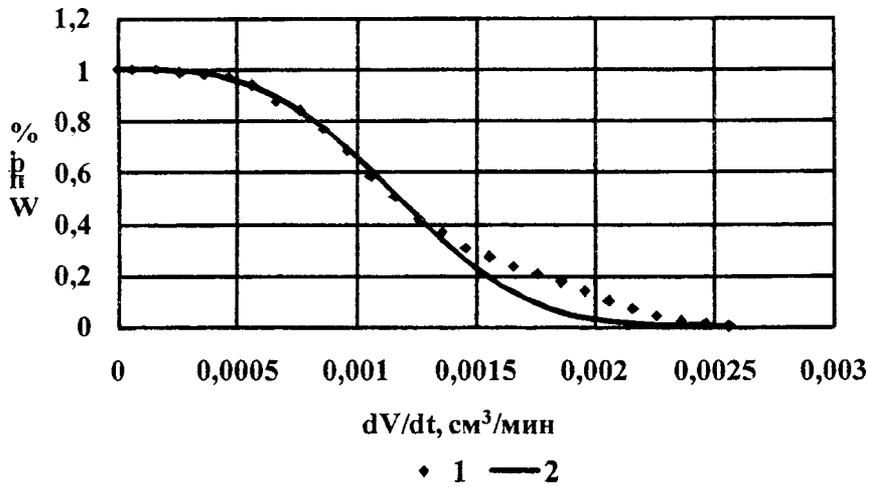


Рис. 4. Кривые зависимости текущей приведенной влажности от скорости объемной усадки для черной смородины:
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные по формуле (3)

Аналогично получены кривые зависимости темпа изменения площади поверхности от приведенной относительной влажности. Для черной смородины они представлены на рис. 5.

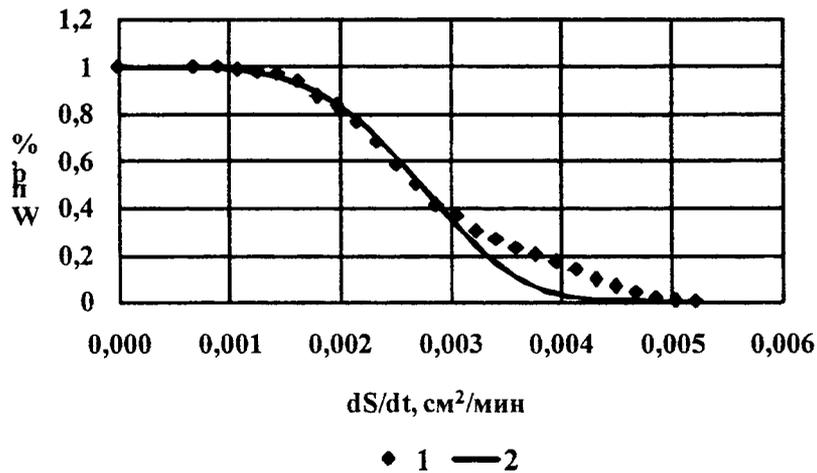


Рис. 5. Кривые зависимости текущей приведенной влажности от скорости изменения площади поверхности для черной смородины:
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные по формуле (3)

Отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает 2%.

Параметры A и N уравнений (2) и (3) определялись по двум парам опытных значений, расположенных на линейном участке кривой, представленной на рис. 4. Таким образом, выражение (2) сводится к системе из двух уравнений, решая которые относительно A и N получим

$$N = \frac{\ln \left(\ln \frac{1}{W_{np1}} / \ln \frac{1}{W_{np2}} \right)}{\ln \left(D_i(t) / (D_i(t)) \right)}, \quad A = \frac{1}{(D_i(t))^N} \ln \frac{1}{W_{np1}}. \quad (4)$$

Расчетные значения параметров A и N для различных ягод сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения параметров уравнений (2) и (3) для различных видов ягод

Наименование ягоды	Расчетные значения коэффициентов			
	Изменение объема		Изменение площади поверхности	
	A	N	A	N
Ежевика	$3,16 \cdot 10^8$	2,532	$9,46 \cdot 10^6$	3,4
Вишня	$5,16 \cdot 10^8$	4,33	$3,2 \cdot 10^9$	5,29
Черная смородина	$8,94 \cdot 10^8$	3,11	$8,14 \cdot 10^{10}$	4,32
Красная смородина	$1,2 \cdot 10^{49}$	16,24	$5,08 \cdot 10^{17}$	6,83
Крыжовник	$9,36 \cdot 10^{14}$	6,57	$2,29 \cdot 10^{10}$	4,1

Относительные объемная усадка и изменение площади поверхности ягод рассчитывается по формулам:

$$\delta_V = \frac{V_0 - V}{V_0}; \quad \delta_S = \frac{S_0 - S}{S_0}. \quad (5)$$

Графические зависимости относительной объемной и поверхностной усадки от времени для различных ягод представлены на рис. 6 и 7.

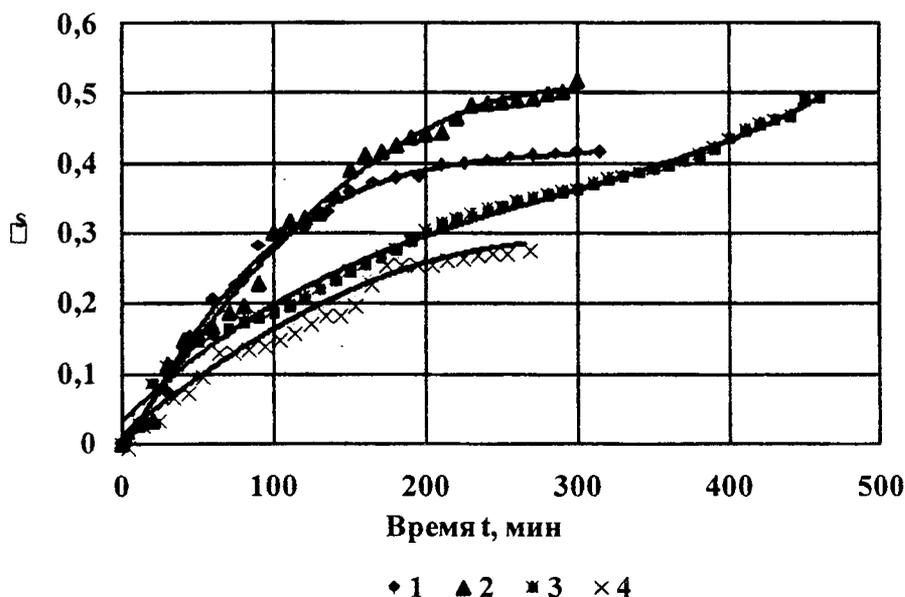


Рис. 6. Кривые зависимости относительной поверхностной усадки от времени для смородины при различных температурных режимах сушки:

1 – красная смородина 90°C; 3 – красная смородина 75°C;
2 – черная смородина 90°C; 4 – черная смородина 80°C

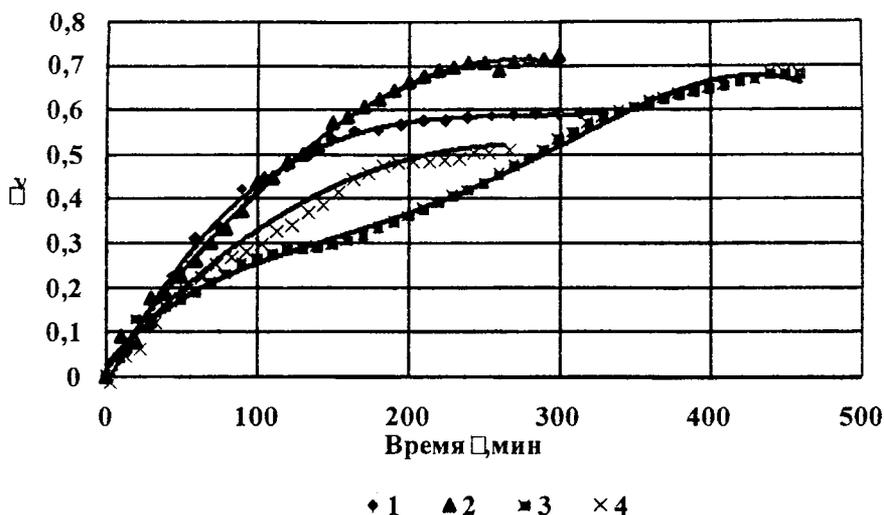


Рис. 7. Кривые зависимости относительной объемной усадки от времени для смородины при различных температурных режимах сушки:
 1 – красная смородина 90°C; 3 – красная смородина 75°C;
 2 – черная смородина 90°C; 4 – черная смородина 80°C

Для характеристики кинетики развития напряжений в объекте сушки используется коэффициент ν_0 [5], который равен отношению темпа объемной усадки ягоды к темпу изменению массы в процессе сушки и находится по формуле

$$\nu_0 = \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta G}, \quad (6)$$

где ΔV – изменение объема ягоды в единицу времени, см³/мин;
 ΔG – изменение массы ягоды в единицу времени, г /мин;
 ρ – плотность воды, г/см³.

По величине коэффициента ν_0 , осредненное по времени значение которого для различных ягод представлено в табл. 2, судят о продвижении поверхности испарения вглубь ягоды.

Таблица 2

Среднее по времени значение коэффициента ν_0 для различных ягод

Сорт ягоды	Вишня	Крыжовник	Ежевика	Красная смородина	Черная смородина
ν_0	1,63	1,17	1,5	1,76	0,65

Анализ полученных значений коэффициента ν_0 показал, что для крыжовника «темп усадки» соответствует «темпу (скорости) сушки» ($\nu_0 \approx 1$). Для вишни, ежевики и красной смородины ($\nu_0 > 1$), т.е. под действием внутренних напряжений «выжимаются» пустоты, что приводит к более существенному снижению объема по сравнению с убылью влаги. В случае с черной смородиной ($\nu_0 < 1$), что соответствует опережающему темпу потери влаги по отношению к уменьшению объема. В результате поверхность испарения углубляется и увеличивается длина пути диффундирования влаги с внутренних слоев ягоды.

На рис. 8 представлен график зависимости коэффициента ν_0 от времени.

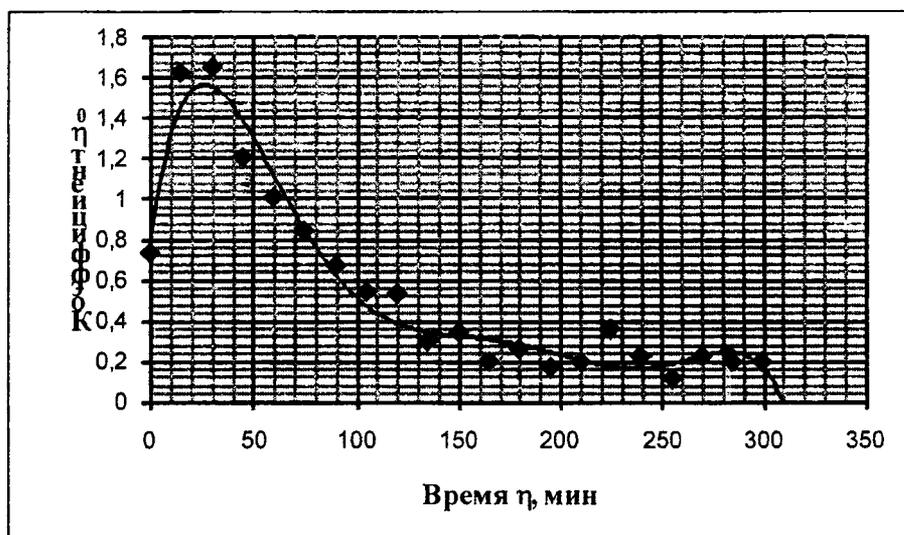


Рис. 8. Кривая зависимости коэффициента u_0 от времени

Проведенные нами исследования в совокупности позволили получить новые достоверные экспериментальные данные по сушке и усадке различных пищевых продуктов, на базе которых расчетным путем определены скорости объемной и поверхностной усадки, а также параметр скорости продвижения фронта поверхностного уплотнения высушиваемых материалов при потере структурной влаги.

Установлено, что темп объемной усадки наиболее значителен в первый период сушки и падает по времени. Причем темп объемной усадки примерно на 25-30% больше, чем темп поверхностной усадки. Построены кривые, отражающие изменение объема и площади поверхности ягод во времени, осуществлен подбор уравнений для этих кривых. Их сравнение при различных температурах сушки показало, что при более высоких температурах объемная и поверхностная усадка ягод достигает более высоких значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левьюк, Л.Н. Разработка технологии получения пищевых порошков из фруктов и ягод / Л.Н. Левьюк, Л.А. Изотова, В.А. Шуляк // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев, 27 января 2005 г. / Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С.Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 270.
2. Изотова, Л.А. Контроль геометрических параметров плодов и ягод в процессе термоусадки при сушке / Л.А. Изотова, В.А. Шуляк // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 2-й межд. научн.-техн. конф., Могилев, 19-20 октября 2006 г. / Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И.С.Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 216–217.
3. Гинзбург, А.С. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств / А.С. Гинзбург, С.М. Гребенюк, Н.С. Михеева и др. – М.: Агропромиздат, 1990. – 256 с.
4. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.
5. Гинзбург, А.С. Технология сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 248 с.