

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

УДК 637.33:66.047.3.085.1

**В.А. Ермолаев, М.А. Яковченко,  
А.А. Косолапова**

### АНАЛИЗ УСАДОЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ВАКУУМНОЙ СУШКИ СЫРОВ

**V.A. Ermolaev, M.A. Yakovchenko,  
A.A. Kosolapova**

### THE ANALYSIS OF THE SHRINKABLE PHENOMENA IN THE COURSE OF VACUUM DRYING OF CHEESES

**Ермолаев В.А.** – д-р техн. наук, доц. каф. природообустройства и химической экологии Кемеровского государственного сельскохозяйственного института, г. Кемерово. E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

**Яковченко М.А.** – канд. хим. наук, доц., и. о. зав. каф. природообустройства и химической экологии Кемеровского государственного сельскохозяйственного института, г. Кемерово. E-mail: mara.2002@mail.ru

**Косолапова А.А.** – ассист., зав. лаб. каф. природообустройства и химической экологии Кемеровского государственного сельскохозяйственного института, г. Кемерово. E-mail: mara.2002@mail.ru

**Ermolaev V.A.** – Dr. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Environmental Engineering and Chemical Ecology, Kemerovo State Agricultural Institute, Kemerovo. E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

**Yakovchenko M.A.** – Cand. Chem. Sci., Assoc. Prof., Deputy Manager, Chair of Environmental Engineering and Chemical Ecology, Kemerovo State Agricultural Institute, Kemerovo. E-mail: mara.2002@mail.ru

**Kosolapova A.A.** – Asst. Manager, Lab., Chair of Environmental Engineering and Chemical Ecology, Kemerovo State Agricultural Institute, Kemerovo. E-mail: mara 2002@mail.ru

*Работа посвящена исследованию усадочных явлений при вакуумном обезвоживании сыров марок Советский и Голландский. Получены зависимости коэффициента усадки сыров от начальной массовой доли влаги. Обнаружено, что с увеличением массовой доли влаги сыра происходит повышение коэффициентов усадки продукта. Наибольшее увеличение коэффициента усадки сыров наблюдается при массовой доле влаги более 50 %. Установлена зависимость величины коэффициента усадки от начальной массовой доли влаги сыров в процессе вакуумной сушки. Проанализировано влагосодержание в поверхностных и центральных слоях сыров при вакуумной сушке. Установлено, что при увеличении температуры, тепловой нагрузки влагосодержание на поверхности сыров быстро уменьшается, между тем в центральных слоях оно изменяется медленнее. Усадка при повышенной температуре*

*меньше, однако сухой сыр имеет большую массовую долю влаги. Обнаружено, что увеличение перепада массовой доли влаги между внутренними и поверхностными слоями сопровождается увеличением разницы между действительной и возможной усадкой, соответствующей количеству удаляемой жидкости. Рассчитаны коэффициенты объемной усадки сыров: для сыров Советский и Голландский они лежат в пределах 0,017–0,004 и 0,006–0,003 соответственно. В ходе аналитическо-экспериментальных исследований получены зависимости коэффициентов усадки сыров от толщины слоя сушки, формы и размеров измельчения.*

**Ключевые слова:** сыры, вакуумная сушка, массовая доля влаги, коэффициент усадки.

*The study is devoted to the research of shrinkable phenomena in vacuum dehydration of cheeses*

*of brands Soviet and Dutch. The dependences of coefficient of shrinkage of cheeses on initial mass fraction of moisture were received. It was revealed that increasing mass fraction of moisture of cheese caused the increase of coefficients of shrinkage of the product. The greatest increase in the coefficient of shrinkage of cheeses was observed at the mass fraction of moisture more than 50 %. The dependence of the size of coefficient of shrinkage on initial mass fraction of moisture of cheeses in the course of vacuum drying was established. Moisture content in superficial and central layers of cheeses at vacuum drying was analyzed. It was established that at the increase in temperature, thermal loading moisture content quickly decreased by surfaces of cheeses, meanwhile in the central layers it changed more slowly. The shrinkage at the increased temperature was less; however, dry cheese had big mass fraction of moisture. It was revealed that the increase in the difference of mass fraction of moisture between internal and surface layers was followed by the increase in the difference between valid and possible shrinkage corresponding to the amount of the deleted liquid. The coefficients of volume shrinkage of cheeses were calculated: for cheeses Soviet and Dutch they were within 0.017–0.004 and 0.006–0.003 respectively. During analytical pilot studies the dependences of coefficients of shrinkage of cheeses on the thickness of layer of drying, the form and the amount of crushing were received.*

**Keywords:** *cheeses, vacuum drying, mass fraction of moisture, shrinkage coefficient.*

**Введение.** Общеизвестно, что в процессе сушки уменьшаются размеры и объем большинства материалов. Это явление называется усадкой материала [1–3]. Например, при конвективной сушке овощи, плоды и крупы дают значительную усадку, уменьшаясь в объеме в 3–4 раза [3].

Большинство материалов (торф, зерно, кожа, тесто, хлеб и т.д.) дают усадку на протяжении всего процесса сушки. Однако ряд материалов (глина, керамические массы и некоторые другие) дают усадку в период постоянной скорости.

При этом усадка прекращается примерно при критическом влагосодержании, если градиент влагосодержания внутри материала невелик. Другие материалы (древесина, уголь) дают усадку только в период падающей скорости, она начинается примерно с критического влагосодержания [1].

Отдельный интерес представляет собой исследование процессов усадки при вакуумной сушке, которая является одной из наиболее перспективных технологий обезвоживания продуктов питания – растительных, мясных, молочных (в том числе сыров) [4].

**Цель работы.** Исследование влияния процесса вакуумной сушки на эффект усадки сыров.

Для реализации указанной цели были сформулированы **задачи:** установление зависимости коэффициентов усадки сыров от массовой доли влаги, анализ влагосодержания сыров в центре и на поверхностных слоях, а также определение зависимости коэффициентов усадки сыров от толщины слоя сушки, формы и размеров измельчения.

**Объекты и методы исследований.** Объектами исследований выступали сыры следующих марок: Голландский и Советский. Сушка осуществлялась при остаточном давлении 2–3 кПа.

**Результаты исследований.** На рисунке 1 представлен график зависимости коэффициента усадки сыров от начальной массовой доли влаги.

Установлено, что с увеличением массовой доли влаги сыра происходит увеличение коэффициентов усадки. Наибольшее увеличение коэффициента усадки наблюдается при массовой доле влаги более 50 %. С изменением массовой доли влаги сыра от 40 до 50 % коэффициент усадки увеличивается на 2,5 %; от 50 до 60 % – на 6,5 %.

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента усадки от начальной массовой доли влаги сыров в процессе сушки. По графикам, представленным на рисунке 2, установлена зависимость: с увеличением массовой доли влаги сыров увеличивается коэффициент усадки.

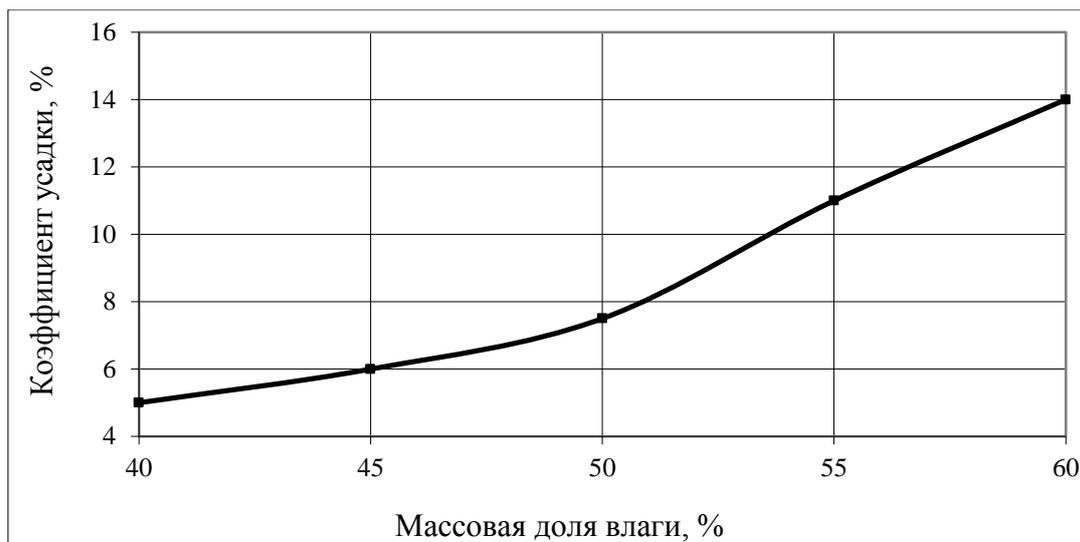


Рис. 1. Зависимость коэффициентов усадки сыров от массовой доли влаги

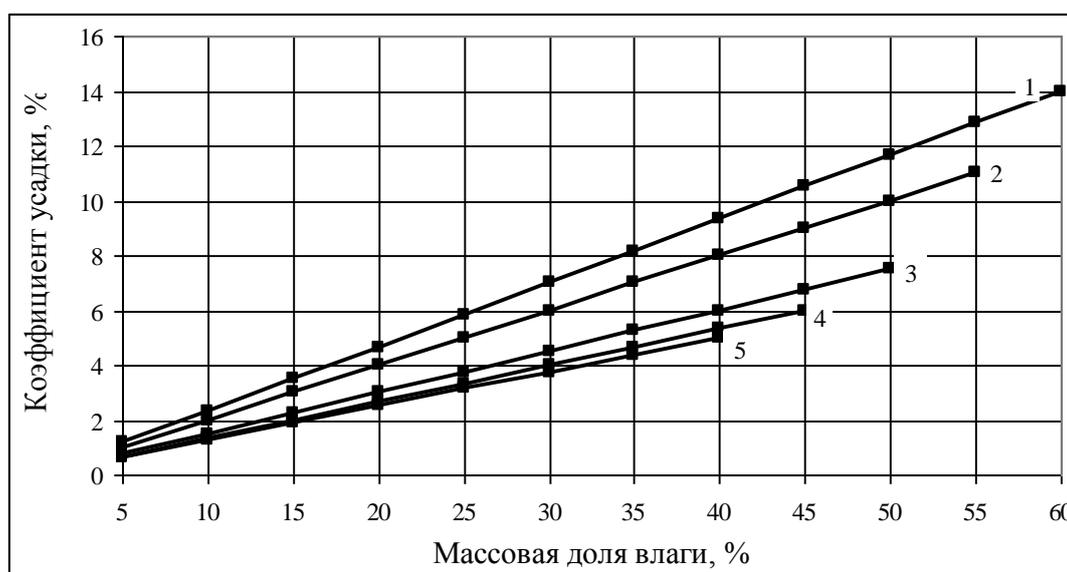


Рис. 2. Зависимость коэффициентов усадки сыров от начальной массовой доли влаги

Если обозначить линейный размер материала (длина, ширина, высота) через  $l$  при массовой доле влаги  $W$ , то можно написать [1]

$$l = l_0 \cdot (1 + \beta_l \cdot W), \quad (1)$$

где  $l_0$  – линейный размер абсолютно сухого материала;  $\beta_l$  – коэффициент линейной усадки, характеризующий интенсивность усадки в 1%, то есть  $\beta_l = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dW}$ .

Формула (1) справедлива при сравнительно небольших градиентах влагосодержания внутри материала. При большом градиенте влагосодержания поверхностные слои материала будут сокращаться быстрее средних.

В таблице 1 приведены показатели влагосодержания сыров Советский и Голландский по толщине слоя 20 мм. Данные влагосодержания по толщине слоя сыров получены при требуемых температурах, тепловых нагрузках и остаточном давлении вакуумной сушки сыров.

Влагодержание сыров по толщине слоя 20 мм, гвл./гсух. вещ.

Сыр	По достижении первой критической точки		По достижении второй критической точки	
	Поверхностные слои	В центре слоя	Поверхностные слои	В центре слоя
Советский	6–9	20–24	4–5	9–17
Голландский	6–8	19–22	4–5	7–12

При увеличении температуры, тепловой нагрузки влагодержание на поверхности сыров быстро уменьшается, между тем в центральных слоях оно изменяется медленнее. Поверхностные слои, которые влияют на размеры материала, стремятся сократиться не пропорционально среднему влагодержанию, а примерно пропорционально влагодержанию на поверхности. Поэтому, начиная с некоторого влагодержания (массовой доли влаги), усадка почти не наблюдается (рис. 3).

Кривые усадки сыров Советский 1 и Голландский 3 получены при требуемой температуре сушки 60°C. Кривые усадки 2, 4 получены при температуре выше требуемой (80°C). При повышенной температуре сушки происходит быстрое пересыхание поверхностных слоев. Центральные слои имеют повышенную массовую долю влаги. Усадка при повышенной тем-

пературе меньше, однако сухой сыр имеет большую массовую долю влаги.

С повышением температуры сушки коэффициент усадки уменьшается, что объясняется увеличением градиента массовой доли влаги внутри материала. При наличии градиента массовой доли влаги поверхностные слои стремятся сократиться больше по сравнению с внутренними. Однако сокращению поверхностных слоев препятствуют внутренние, массовая доля влаги которых больше, чем поверхностных. Вследствие этого усадка поверхностных слоев меньше той, которая должна была соответствовать удаленной из них влаги. Следовательно, увеличение перепада массовой доли влаги между внутренними и поверхностными слоями сопровождается увеличением разницы между действительной усадкой и возможной усадкой, соответствующей количеству удаляемой жидкости.

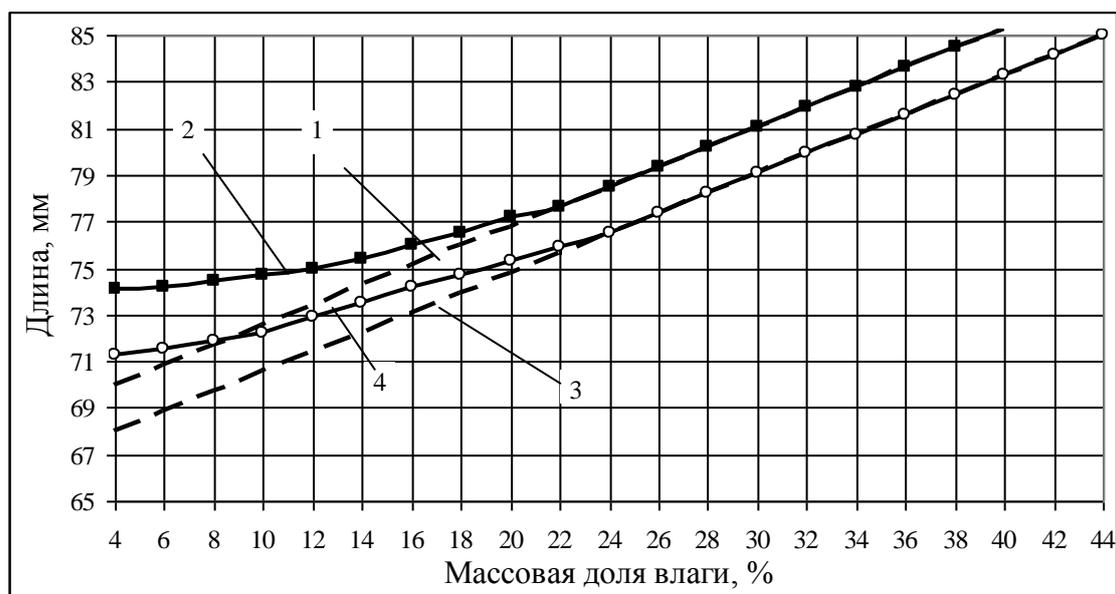


Рис. 3. Кривые усадки сыров Советский (1, 2) и Голландский (3, 4):

1 –  $t=60^{\circ}\text{C}$ ;  $q=5,52 \text{ кВт/м}^2$ ;  $P=2-3 \text{ кПа}$ ; 2 –  $t=80^{\circ}\text{C}$ ;  $q=5,52 \text{ кВт/м}^2$ ;  $P=2-3 \text{ кПа}$ ;

3 –  $t=60^{\circ}\text{C}$ ;  $q=7,36 \text{ кВт/м}^2$ ;  $P=2-3 \text{ кПа}$ ; 4 –  $t=80^{\circ}\text{C}$ ;  $q=7,36 \text{ кВт/м}^2$ ;  $P=2-3 \text{ кПа}$

Таким образом, формула (1) справедлива только при малом градиенте влагосодержания (массовой доли влаги), когда массовая доля влаги  $u$  в любой точке сыров приблизительно равна средней массовой доле влаги  $W(u \sim W)$ . Более строгое написание формулы (1) предложил А.В. Лыков [2, 5]

$$l = l_0 \cdot (1 + \beta_l \cdot W). \quad (2)$$

Для большинства материалов зависимость между объемом тела  $V$  и его влагосодержанием имеет линейный характер

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta_v \cdot W), \quad (3)$$

где  $\beta_v$  – коэффициент объемной усадки, равный отношению уменьшению объема тела при изменении влагосодержания на 1 %,

$$\beta_v = \frac{dV}{V_0 \cdot dW};$$

$V_0$  – объем абсолютно сухого тела.

А.В. Лыков предложил определять коэффициент  $\beta_v$  по двум значениям  $V_1$  и  $V_2$  для массовых долей влаги  $W_1$  и  $W_2$ , например до и после сушки.

Следовательно

$$V_1 = V_0 \cdot (1 + \beta_v \cdot W_1); \quad (4)$$

$$V_2 = V_0 \cdot (1 + \beta_v \cdot W_2). \quad (5)$$

Из этих уравнений можно определить  $V_0$  и  $\beta_v$ . Обозначим относительную (по отношению к первоначальному объему) усадку через

$$\delta = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad (6)$$

тогда

$$\beta_v = \frac{\delta}{(W_1 - W_2) - \delta \cdot W_1}. \quad (7)$$

В таблице 2 приведены коэффициенты объемной усадки сыров.

Таблица 2

### Коэффициенты объемной усадки сыров

Марка сыра	Коэффициент объемной усадки $\beta_v$
Советский	0,017–0,004
Голландский	0,006–0,003

Если линейные размеры сыров изменяются от массовой доли влаги по соотношению (2), то можно найти простую зависимость между  $\beta_v$  и  $\beta_l$ , а также между  $\beta_l$  и  $\beta_s$ .

Площадь образца материала равна произведению длины  $l$  на ширину  $L$ , то есть

$$S = l \cdot L = l_0 \cdot L_0 \cdot (1 + \beta_l \cdot W)^2 = S_0 \cdot (1 + \beta_l \cdot W)^2, \quad (8)$$

где  $S_0 = l_0 \cdot L_0$  – площадь абсолютно сухого материала.

При выводе формулы предполагается, что тело изотропное и усадка по длине и ширине происходит одинаково. Если разложить  $(1 + \beta_l \cdot W)^2$  в ряд, то величина  $\beta_l^2 \cdot W^2$  мала по сравнению с  $2 \cdot \beta_l \cdot W$ ; тогда можно записать

$$S = S_0 \cdot (1 + 2 \cdot \beta_l \cdot W) = S_0 \cdot (1 + \beta_s \cdot W), \quad (9)$$

где  $\beta_s = 2 \cdot \beta_l$  – коэффициент усадки по площади, равен удвоенному коэффициенту линейной усадки.

Коэффициент усадки по площади можно определить по формуле

$$\beta_s = \frac{\delta_s}{(W_1 - W_2) - \delta_s \cdot W_1}, \quad (10)$$

где  $\delta_s = \frac{(S_2 - S_1)}{S_1}$  – относительная усадка по площади.

Зависимость между объемом материала и влагосодержанием запишется следующим образом:

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta_v \cdot W)^3. \quad (11)$$

Можно получить приближенную формулу

$$V = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \beta_v \cdot W) = V_0 \cdot (1 + \beta_v \cdot W), \quad (12)$$

где  $\beta_v = 3 \cdot \beta_l$  – коэффициент объемной усадки, равный утроенному коэффициенту линейной усадки.

**Выводы.** Таким образом, получены зависимости коэффициентов усадки сыров от толщины слоя сушки, формы и размеров измельчения. При толщине слоя сушки от 10 до 30 мм коэффициент усадки сыров в зависимости от формы и размеров измельчения составляет от 3 до 14 %. С увеличением массовой доли влаги сыров происходит увеличение коэффициентов усадки. Определено, что усадка сыров в обоих периодах вакуумной сушки происходит равномерно. При повышении температуры сушки выше требуемой коэффициент усадки уменьшается, что объясняется увеличением градиента массовой доли влаги внутри материала.

#### Литература

1. *Льков А.В.* Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.
2. *Льков А.В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.

3. Сушка пищевых растительных материалов / *Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Я.М. Гольденберг* [и др.]. – М.: Пищ. пром-сть, 1971. – 439 с.
4. *Ермолаев В.А.* Особенности производства сухих сыров способом вакуумной сушки // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 12. – С. 202–205.
5. *Льков М.В.* Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 429 с.

#### Literatura

1. *Lykov A.V.* Teorija sushki. – M.: Jenergija, 1968. – 470 s.
2. *Lykov A.V.* Teplo- i massoobmen v processah sushki. – M.; L.: Gosjenergoizdat, 1956. – 464 s.
3. *Sushka pishhevyh rastitel'nyh materialov* / *G.K. Filonenko, M.A. Grishin, Ja.M. Gol'denberg* [i dr.]. – M.: Pishh. prom-st', 1971. – 439 s.
4. *Ermolaev V.A.* Osobennosti proizvodstva suhikh syrov sposobom vakuumnoj sushki // Vestnik KrasGAU. – 2009. – № 12. – S. 202–205.
5. *Lykov M.V.* Sushka v himicheskoj promyshlennosti. – M.: Himija, 1970. – 429 s.

