

**В.А. Ермолаев, Г.А. Масленникова, Н.А. Комарова, Д.Е. Фёдоров**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ЯГОД**

Был проведен эксперимент по сублимационной сушке ягод, в ходе которого снимались показания температуры и массы продукта. На основании полученных графиков были определены рациональные режимы сушки данным методом.

Ягоды, сублимационная сушка, кривые температуры.

### **Введение**

Целью работы является исследование процесса сублимационной сушки ягод. Интерес данного метода связан с тем, что в настоящее время этот способ сушки является наиболее эффективным. Низкая, порядка 2–5 %, конечная влажность сублимационных материалов создает предпосылки для их длительного хранения в условиях нерегулируемых температур. Этот метод применяется тогда, когда требуется обеспечить сохранность в сухом объекте всех полезных начал сырья в течение длительного времени. Сублимированные продукты, обладая меньшей массой, сохраняют первоначальные размеры, форму и цвет.

Существуют два вида сублимационной сушки: атмосферная и вакуумная. Сушка при низких температурах и при атмосферном давлении происходит очень медленно. Поэтому с целью интенсификации процесса сушки применяют сушку в вакууме. Уменьшение давления резко увеличивает интенсивность испарения за счет повышения коэффициента массообмена, который в первом приближении обратно пропорционален давлению. Так как вакуумная сушка происходит в герметически закрытом аппарате, то передача тепла конвекцией невелика. Поэтому, чтобы поддержать значительную интенсивность сушки в вакууме, тепло, необходимое для испарения жидкости, подводится к сушиму материалу путем теплопроводности от нагретой поверхности (контактная сушка) или радиацией от нагретых экранов (сушка инфракрасными лучами) [1].

Основной сублимационный процесс состоит из трех этапов: замораживание, сублимирование и досушивание. На первом этапе температура продукта опускается ниже температуры его затвердевания, после чего внутри продукта образуются кристаллы льда. Далее в процессе сублимирования кристаллы льда исчезают. Этот этап может оказать существенное влияние на уровень качества продукта. Если провести быструю и глубокую заморозку продукта, в нем образуются лишь маленькие ледяные кристаллы, которые потом быстро испарятся. Заключительный этап – досушивание осуществляется с подводом тепла при температуре не более +40 °С.

Ягоды по своей природе являются капиллярно-пористыми телами, а по природе коллоидами. Для них характерны свойства капиллярно-пористых и коллоидных тел. Стенки их капилляров эластичны и при поглощении жидкости набухают [1]. При уда-

лении жидкости эти тела дают усадку, становятся хрупкими и могут быть превращены в порошок.

Удаление влаги из материала при сушке зависит от общего содержания влаги и вида связи влаги с материалом. Связь влаги с материалом характеризуется величиной свободной энергии изотермического обезвоживания – работой, необходимой для удаления 1 моля воды при постоянной температуре без изменения состава вещества при данном влагосодержании.

При наличии в материале свободной влаги энергия связи равна 0. По мере удаления влаги прочность ее связи с материалом увеличивается и энергия связи возрастает. Чем меньше влагосодержание материала, тем больше величина энергии связи.

Влажные материалы, подвергаемые термической обработке или периодическому воздействию тепла и влаги, изменяют свои физические свойства. Эти изменения обусловлены молекулярным характером связи поглощенной жидкости с веществом тела. Кроме того, перенос поглощенной жидкости или пара внутри коллоидного капиллярно-пористого тела зависит от характера молекулярной связи жидкости, содержащейся в теле, с веществом скелета тела [1].

Все формы связи по П.А. Ребиндеру делятся на три большие группы: химическая связь, физико-химическая связь, физико-механическая связь. В пищевых продуктах присутствуют все вышеприведенные формы связи влаги, однако на различных этапах сушки продуктов основную роль играет тот или иной вид связи. Механически связанная вода самая слабая, удерживается за счет заполнения макро- и микрокапилляров. Ее можно рассматривать как свободную влагу, которая при сублимационной сушке удаляется в виде кристаллов льда. Физико-химическая связь более прочная. В нее входит адсорбционно и осмотически связанная влага, которая удаляется в процессе досушки. Химическая связь является самой прочной, химически связанная вода при сушке практически не удаляется.

Ягоды как объект сушки характеризуются большим количеством воды и малым содержанием сухих веществ. Основная часть воды находится в свободном виде и только около 5 % связано с клеточными коллоидами и прочно удерживается. Химический состав ягод представлен углеводами, белками, липидами. В небольших количествах содержатся биологически активные вещества, которые определяют вкус и биологическую ценность сырья:

полифенолы, витамины, органические кислоты, минеральные вещества. Ниже в табл. 1 приведено содержание питательных веществ в ягодах, использованных в данной работе [2].

Таблица 1

Содержание питательных веществ в ягодах

Питательные вещества, г/100 г	Смородина черная	Жимолость	Клубника
Вода	83,3	88,4	87,4
Белки	1,0	1,0	0,8
Жиры	0,4	0,5	0,4
Углеводы	7,3	8,0	7,5
Калорийность, ккал	35,0	30,0	34,9

### Материалы и методы

В данной работе использовалась лиофильная сушилка «ИНЕЙ-6М», представляющая собой модернизированную версию сушилки «ИНЕЙ-6» Института биологического приборостроения Российской академии наук. Модернизированная версия отличается большей емкостью сушильных камер и наличием в них инфракрасных нагревателей. Внешний вид этой установки приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид установки «ИНЕЙ-6М»

«ИНЕЙ-6М» условно состоит из двух блоков – холодильная машина и непосредственно сама сублимационная установка. Принцип действия заключается в следующем. Продукт с комнатной температурой загружают в сушильную камеру. После включения установки вакуум-насос понижает давление в камере до 10–30 Па. За счет создания вакуума и частичного испарения свободной влаги происходит замораживание продукта. Большая часть преобразуется в кристаллы льда, после чего начинается процесс сублимации. Влажный пар за счет действия вакуум-насоса попадает в десублиматор, где влага оседает в виде льда. Воздух из десублиматора выбрасывается в атмосферу. Для завершающей стадии процесса сушки включают лампы, которые нагревают продукт инфракрасными лучами и удаляют оставшуюся влагу. В установке также предусмотрена

оттайка льда в испарителе. Для этого открывают соленоидный клапан на перепускной линии нагнетательной стороны компрессора, в результате чего горячие пары хладагента попадают в испаритель и нагревают его. В данном агрегате используется фреон 404а. Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.

Для регистрации температур использовался 8-канальный измеритель температуры ОВЕН ТРМ138. Для измерения массы каждые 30 мин продукт вынимали из камеры и взвешивали на аналитических весах ВСЛ-200/0,1А с точностью до 0,1 мг.

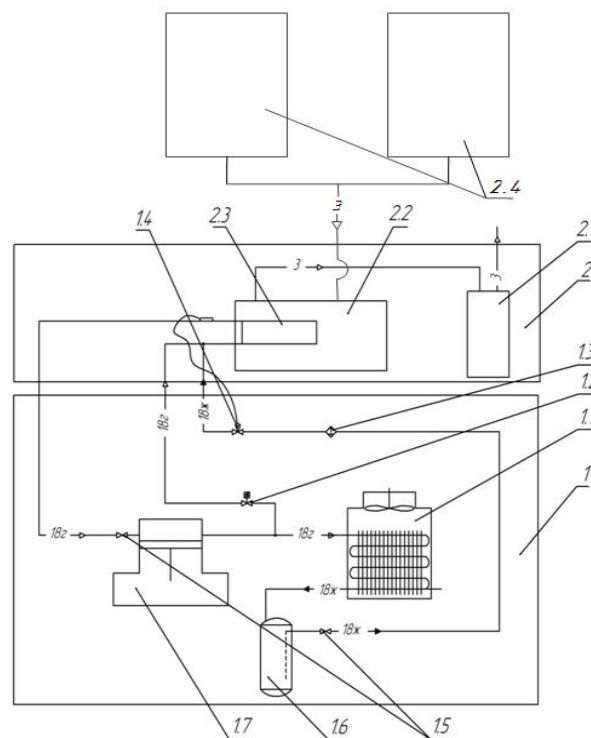


Рис. 2. Принципиальная схема сублимационной установки: 1 – холодильная машина; 1.1 – конденсатор; 1.2 – соленоидный клапан; 1.3 – фильтр-осушитель; 1.4 – терморегулирующий клапан; 1.5 – клапан запорный; 1.6 – ресивер; 1.7 – компрессор; 2 – вакуумная установка; 2.1 – вакуумный насос; 2.2 – десублиматор; 2.3 – испаритель десублиматора; 2.4 – сушильные камеры

Эксперимент проводился с тремя различными сортами ягод: клубника, смородина и жимолость. В ходе эксперимента снимались показания температур на поверхности и внутри ягод, температура в камере и в десублиматоре, масса продукта. Критериями определения рационального режима являлись продолжительность сушки, энергозатраты и качественные показатели сухих ягод.

### Результаты и их обсуждение

На основании полученных данных были построены графики. Ниже на рис. 3 представлен график зависимости температуры продукта от времени сушки.

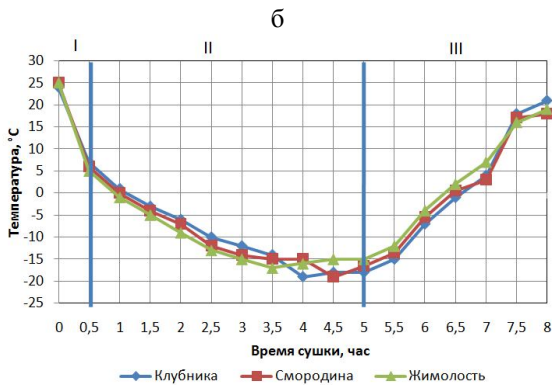
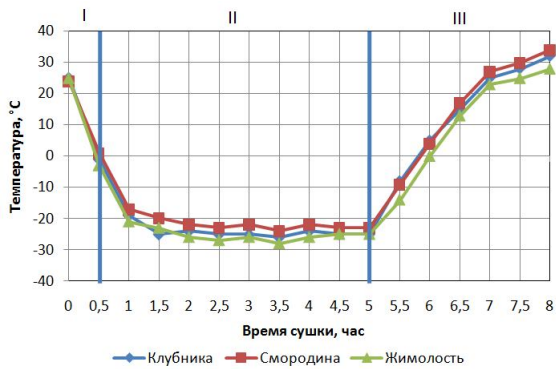


Рис. 3. Зависимость температуры продукта на поверхности (а) и в центре (б) от времени сушки

На графиках весь процесс сушки разбит на три этапа. Первый этап – замораживание характеризуется резким падением температуры продукта, что отчетливо прослеживается на 1-м графике. На 2-м этапе температура продукта продолжала падать. На поверхности продукта уже после 2 часов от начала сушки установилась рациональная температура в пределах  $(-20 \dots -30)^\circ\text{C}$ , в то время как в центре продукта она продолжала понижаться и достигла нужного уровня после 5 часов от начала сушки, что видно на 2-м графике. Таким образом, рациональное время сублимирования составило 4,5 часа. Затем на 3-м этапе происходило досушивание продукта путем энергоподвода. На графиках этот процесс характеризуется постепенным повышением температуры продукта.

На рис. 4 в качестве примера приведен график зависимости относительной массы клубники от времени сушки. Из графика видно, что на этапе заморозки масса клубники не изменялась. На 2-м этапе сушки удалась большая часть влаги продукта, которая составила порядка 58 % от общей массы. В процессе досушивания испарилась оставшая влага. После 6,5 часов скорость сушки резко упала, что свидетельствует о том, что почти вся влага из продукта была удалена. Из графика следует вывод о том, что рациональное время сушки данным методом 7–8 часов. Конечная масса высушенной клубники составила 30,2 % от первоначальной, смородины и жимолости соответственно 28 и 27,4 %.

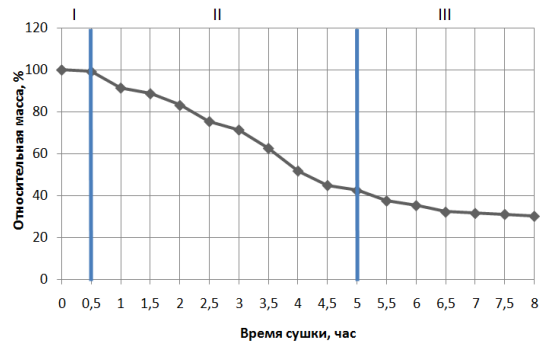


Рис. 4. Зависимость массы клубники от времени сушки

На рис. 5 и 6 изображены кривые температур в камере сушки и в испарителе. На первом графике видно, что температура в камере на 1-м этапе почти не изменяется, а на протяжении всего процесса не опускается ниже  $10^\circ\text{C}$ . Это объясняется снижением конвективной составляющей теплообмена в вакууме. Температура испарителя при этом понижается до  $-36^\circ\text{C}$ . На этапе сублимации ближе к 2 часам после начала сушки процесс приобретает стационарный характер и температура в испарителе держится на уровне  $(-41 \dots -43)^\circ\text{C}$ . В камере же за счет сублимации льда температура постепенно снижается до  $12^\circ\text{C}$ . После включения подогрева кривая сушки на 1-м графике резко пошла вверх. Скачок температуры виден и на 2-м графике, однако за счет системы автоматического поддержания заданного температурного режима в испаритель начинает поступать больше хладагента и температура выравнивается. После 8 часов процесса сушки температура в камере достигла  $42^\circ\text{C}$ .

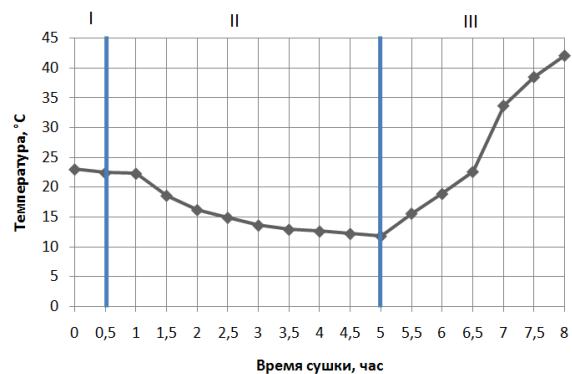


Рис. 5. Зависимость температуры в камере от времени сушки

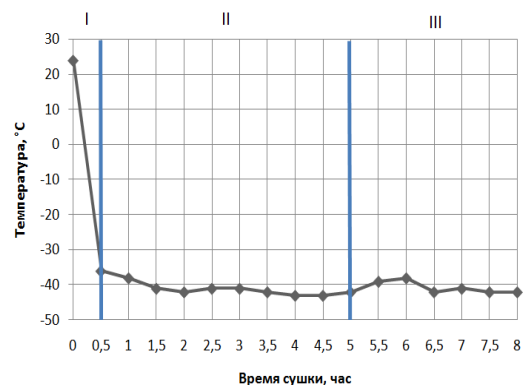


Рис. 6. Зависимость температуры испарителя от времени сушки

Следствием выполненной работы явилось выявление рациональных температурно-временных режимов сублимационной сушки ягод. Из результатов данной работы можно сделать вывод о том, что при давлении  $(20 \pm 5)$  Па температура испарителя должна составлять  $(-42 \pm 2)$  °С, общее время замораживания и сублимации – не более 5 часов, общее время сушки – около 8 часов. На этапе сублимации температура на поверхности продукта должна лежать в пределах  $(-25 \pm 5)$  °С. Сушку следует прекращать при достижении температуры в камере выше 40 °С, при

этом температура на поверхности продукта должна составлять  $(30 \pm 5)$  °С.

Рациональный режим сублимационной сушки обеспечивает более полное вымораживание влаги в процессе предварительного замораживания, равномерный выход паров из материала за счет более мягкого температурного режима на стадии сублимации и равномерное досушивание продукта. Разумеется, длительность сублимационной сушки может варьироваться в зависимости от температуры и толщины слоя замороженного продукта, разрежения в камере и физико-химических свойств высушиваемого материала.

#### Список литературы

1. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1968. – 468 с.
2. <http://usefulmeal.narod.ru/>

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,  
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.  
Тел./факс: (3842) 73-40-40  
e-mail: [office@kemtipp.ru](mailto:office@kemtipp.ru)

#### SUMMARY

**V.A. Yermolaev, G.A. Maslennicova, N.A. Komarova, D.E. Fedorov**

#### **Research of berries freeze drying**

The experiment on freeze drying of berries has been carried out. The product temperature and weight have been registered during the experiment. On the basis of the data obtained the optimum conditions of drying with the given method have been defined.

Berries, freeze drying, temperature curves.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology  
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia  
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40  
e-mail: [office@kemtipp.ru](mailto:office@kemtipp.ru)

