

УДК 637.182

Выбор режимных параметров вакуумной сублимационной сушки сухих термолабильных материалов с заданным уровнем качества

Д-р техн. наук Г. В. СЕМЕНОВ¹, канд. техн. наук И. С. КРАСНОВА²

¹sgv47@yandex.ru, ²ira3891@mail.ru

Московский государственный университет пищевых производств
125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11

И. И. ПЕТКОВ

ООО «Эсборн», 101000, г. Москва, Малый Златоустинский пер., 6

Рассмотрен процесс сублимационной сушки сырья растительного происхождения (яблоки, груши, сливы, дыня) при температурах удаления влаги фазовым переходом «лед — пар» от -10 до -35 °С, соответствующей глубине вакуума в сушильных устройствах, а также различных режимах работы холодильных машин и вакуумных насосов. До начала сублимационной сушки фрукты размещали на противнях слоем, или в виде ломтиков, затем замораживали в условиях вынужденной конвекции в морозильной камере при температуре -20 °С. По окончании этапа замораживания сырье помещали в сублимационную установку. Сушку осуществляли при различных температурах на этапе сублимации в диапазоне -10 ... -35 °С. Температура на стадии досушки равна 38 – 40 °С. Конечная влажность высушенных образцов составила $1,5$ – $2,2$ %. Понижение температуры сублимации с -10 до -30 °С приводит к увеличению длительности сушки с $7,5$ до 22 ч. При этом отмечается, что понижение температуры сублимации с -10 до -30 °С сопровождается более высокой сохранностью витамина С с 30 % до 80 % от исходного. Это является наглядным показателем влияния температуры сублимации на качество объектов сушки. Результаты исследования также показали, что сушка при все более низких температурах сублимации ведет к увеличению общих энергозатрат. При температуре сублимации -10 °С удельный расход электроэнергии составляет $2,4$ – $2,8$ кВт·ч/кг удаленной влаги. При понижении температуры сублимации до -30 °С этот показатель возрастает до $3,5$ – $3,7$ кВт·ч/кг удаленной влаги. Показаны пути снижения удельных энергозатрат на вакуумную сублимационную сушку посредством адаптации конструкций сушильных устройств и режимов их работы к уровню формулируемых заказчиком параметров качества для каждого конкретного вида сырья.

Ключевые слова: вакуумная сублимационная сушка, температурные режимы, энергозатраты, качество, комплексный показатель качества.

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.03.2016, принята к печати 09.02.2017

doi: 10.21047/1606-4313-2017-16-1-18-24

Ссылка для цитирования

Семенов Г. В., Краснова И. С., Петков И. И. Выбор режимных параметров вакуумной сублимационной сушки сухих термолабильных материалов с заданным уровнем качества // Вестник Международной академии холода. 2017. № 1. С. 18-24.

The choice of parameters for vacuum freeze-drying of dry heat-sensitive material with predetermined properties

D. Sc. G. V. SEMENOV¹, Ph. D. I. S. KRASNOVA²

¹sgv47@yandex.ru, ²ira3891@mail.ru

Moscow State University of food production
125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe highway, 11

I. I. PETKOV

JSC «Esborn», 101000, Russia, Moscow, Malyy Zlatoustinskii per., 6

The article deals with freeze drying of fruits (apples, pears, plums, melon) at the temperatures of moisture removal with phase transition from ice to vapor (from -10 °C to -35 °C) corresponding to the vacuum depth in dryers, and at different regimes for refrigerating machines and vacuum pumps operation. Before drying the layer of sliced fruits were placed on the pan and were frozen under forced convection at the refrigerating chamber at -20 °C. After refrigeration the raw material was placed into freeze drying unit. Drying temperature at sublimation stage varied from -10 to -35 °C. The temperature of drying completion was 38 – 40 °C. The final moisture content of the samples was 1.5 – 2.2 %. The sublimation temperature drop from -10 °C to -30 °C results in increasing drying time from 7.5 to 22 h. At the same time the content of ascorbic acid increases from 30 % to 80 % from the original one. Then, sublimation temperature effect on drying quality is proved. The

lower temperatures of sublimation are shown to result in an increased general power consumption. At $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ it is 2.4–2.8 kWh/kg of removed moisture. When sublimation temperature drops to $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ specific power consumption increases up to 3.5–3.7 kWh/kg of removed moisture. The possibility of reducing the specific energy consumption on the vacuum freeze-drying by adapting the installation design of drying devices and adapting the regimes of their work to the level of quality parameters necessary for the customer is shown.

Keywords: vacuum freeze-drying, temperature regimes, energy consumption, quality, comprehensive quality index.

Развитие вакуумной и холодильной техники позволило во все возрастающих масштабах использовать в пищевой промышленности новые технологии удаления влаги при давлениях ниже давления тройной точки воды. Объекты сушки предварительно замораживаются при низких температурах, а последующее удаление влаги происходит в вакууме фазовым переходом «лед — пар». Такая сушка называется сублимационной, реже лиофильной, молекулярной. Замораживание обеспечивает фиксацию важнейших нативных свойств (витаминный и белковый состав, форма, размер, вкус, цвет, и т. д.), а последующее удаление льда сублимацией сохраняет эти свойства и создает пористую структуру. Поэтому сублимированные продукты — продукты высокого качества, с быстрой регидратацией и с длительными сроками хранения. Недостатками этой технологии в сравнении с обычной тепловой сушкой при атмосферном давлении являются низкая интенсивность, высокие энергозатраты и сложное оборудование [1–7]. Это верно по своей сути утверждение на практике требует детализации, поскольку вышеупомянутые недостатки численно существенно различаются в зависимости от конкретных параметров процесса сушки. В работе представлены собственные результаты количественных оценок процессов сублимационной сушки продуктов растительного происхождения, а также обобщенные результаты отечественных и зарубежных исследователей в этой области.

Качество это один из основных показателей эффективности функционирования технологической системы. Оно является результатом взаимосвязанного динамического изменения режимных параметров и теплофизических свойств объектов переработки [8, 9]. Согласно определению ИСО 9000–2001 под качеством понимается «совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые ожидания». Вопросам определения качества и управления им сегодня посвящено огромное количество исследований, при этом многие аспекты данной проблемы все еще не имеют общепринятых единых толкований. В рассматриваемой сфере производства сухих сублимированных пищевых продуктов современным подходом является оценка уровня качества в соотношении с уровнем затрат на его достижение, что является основанием правомерности использования термина заданный уровень качества.

Уровень качества каждого конкретного продукта может быть оценен на основании десятков локальных показателей. Нами предложено дать общую численную оценку уровню качества пищевых продуктов, подвергаемых тепловым воздействиям. Метод основан на развитии идей по численной оценке качества продуктов при холодильной обработке [1, 10]. На основе результатов экспериментальных исследований Бражниковым А. М. и Каухчешвили Э. И. было показано, что при холодильном

хранении комплексный критерий качества K уменьшается во времени τ от начального уровня K_0 по экспоненциальному закону

$$K = K_0 \cdot \exp(-m\tau), \quad (1)$$

где m — экспериментальный коэффициент.

Зависимость (1) можно рассматривать как кинетическое уравнение реакции первого порядка [3], каноническая форма которого имеет вид

$$c_0 - x = c_0 \cdot \exp(-k\tau), \quad (2)$$

где c_0 — начальная концентрация некоторого целевого компонента; k — константа скорости реакции разложения данного компонента; x — уменьшение концентрации.

Идентичность структуры и физического смысла выражений (1) и (2) обусловлена одинаковым характером кинетики рассматриваемых процессов — холодильной хранения и сублимационной сушки. При этом коэффициент m в выражении (1) приобретает смысл константы скорости реакции разложения, которая в соответствии с уравнением Аррениуса, является сильной функцией температуры. Основываясь на этих положениях, нами предложена зависимость, характеризующая в безразмерной форме уровень изменения качества продукта Δ в ходе его обезвоживания:

$$\Delta = F_0 \cdot \exp\left(-\frac{a}{T} + b\right), \quad (3)$$

где F_0 — число Фурье, определяющее в безразмерной форме длительность процесса, $F_0 = a\tau/H^2$. Время высушивания τ находится по известным зависимостям для сублимационной сушки, $a = 7100$, $b = 14,04$ — коэффициенты аппроксимации, численные значения которых найдены по методике, приведенной в работе [10].

Таким образом, можно представить комплексный показатель качества в форме, отражающей совокупное влияние режима обезвоживания и определяемой им продолжительности процесса с одной стороны, и температурной зависимости скорости реакции разложения целевого компонента с другой. При этом величина Δ приобретает смысл «количества теплового воздействия» на обрабатываемый материал. Этот термин был предложен А. А. Гухманом [11].

На рис. 1 представлена расчетная зависимость изменения уровня качества Δ сухого материала при различных температурах влагоудаления. Как следует из рисунка, по мере понижения давления в сушильной камере, применительно к варианту вакуумной сублимационной сушки снижается и количество теплового воздействия. В результате качество сухого продукта возрастает.

Из рис. 1 следует, что качество продукта будет тем выше, чем ниже его температура при сушке, а следовательно, и определяемая этой температурой скорость разложения, а также чем меньше время пребывания про-

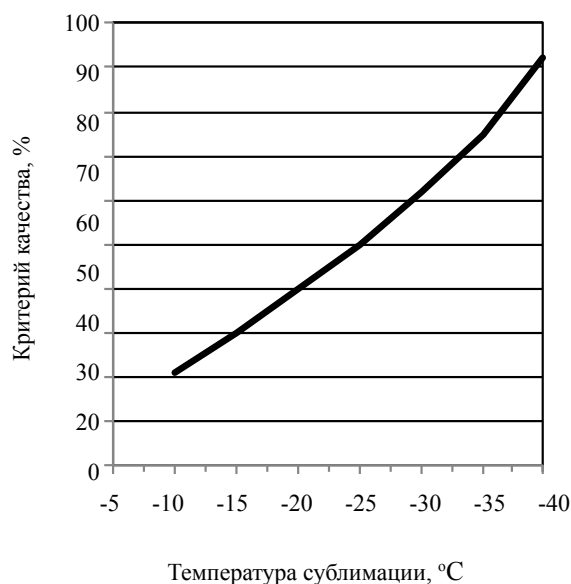


Рис. 1. Расчетная зависимость комплексного показателя качества (в процентах от максимального уровня) от температуры фазового перехода «лед — пар»



а



б

Рис. 2. Сублимационная установка УВС-80М. Сушильная камера (а), холодильная машина десублиматора и блок вакуумных насосов (б)

дукта при этой температуре. Это является общей, основополагающей закономерностью, базирующейся на общепринятых взаимосвязях изменения свойств термолabileльных биообъектов при различных температурных воздействиях на них [12–15]. Однако для практического использования интерес представляют конкретные численные значения, полученные применительно к используемым в промышленном производстве сушильным устройствам. В работе представлены результаты по изменениям режимных параметров, энергозатратам и качеству высушенного материала, полученные с использованием сублимационной установки УВС-80М. Установка эта периодического действия, с кондуктивным теплоподводом и производительностью до 80 кг сырья/цикл сушки. Общий вид установки показан на рис. 2.

Компьютерная система управления установкой позволяет автоматически поддерживать в сушильной камере заданное давление посредством поэтапного включения двух вакуумных насосов разной производительности и открытия/закрытия вакуумных клапанов на линии всасывания. Заданная температура десублиматора обеспечивается работой холодильной машины в режиме пуск — остановка и соответствующей настройкой ТРВ.

Объектами сушки были яблоки, груши, сливы и дыня. До начала сублимационной сушки фрукты размещали на противнях слоем, или в виде ломтиков, затем замораживали в условиях вынужденной конвекции в морозильной камере при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. По окончании этапа замораживания противни с сырьем помещали в сублимационную установку. Сушку осуществляли при различных в каждом эксперименте температурах на этапе сублимации, в диапазоне $-10\text{...}-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура на стадии досушки всегда была одинаковой, равной $38\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общая длительность процесса и продолжительность этапа сублимации фиксировались по изменению температур в слое высушиваемого сырья. Ещё одним надежным признаком завершения всего цикла сушки являлось прекращение роста давления в камере при закрытии вакуумных вентилей на линии всасывания. Общая длительность цикла сушки варьировалась в пределах 8–24 ч. Конечная влажность высушенных образцов составила 1,5–2,2%.

В качестве показателя, характеризующего качество сублимированных продуктов растительного происхождения, выбрано содержание аскорбиновой кислоты. Данный параметр сильно зависит от уровня температурных воздействий, что позволяет использовать его в качестве оценки режимных параметров процесса, и он четко коррелируется с другими показателями качества растительных продуктов [2, 5, 6, 16–20]. Содержание витамина С в образцах определяли методом потенциометрического титрования. На рис. 3. представлены результаты, полученные нами при измерении содержания витамина С в яблоках сорта «Антоновка» в сравнении с данными других авторов. Яблоки этого сорта имеют наибольшее содержание витамина С в них и, соответственно, легче проследить его изменение.

Как следует из представленных на рис. 3 данных, понижение температуры сублимации сопровождается более высокой сохранностью витамина С. Ещё одним наглядным показателем влияния температуры сублимации на качество

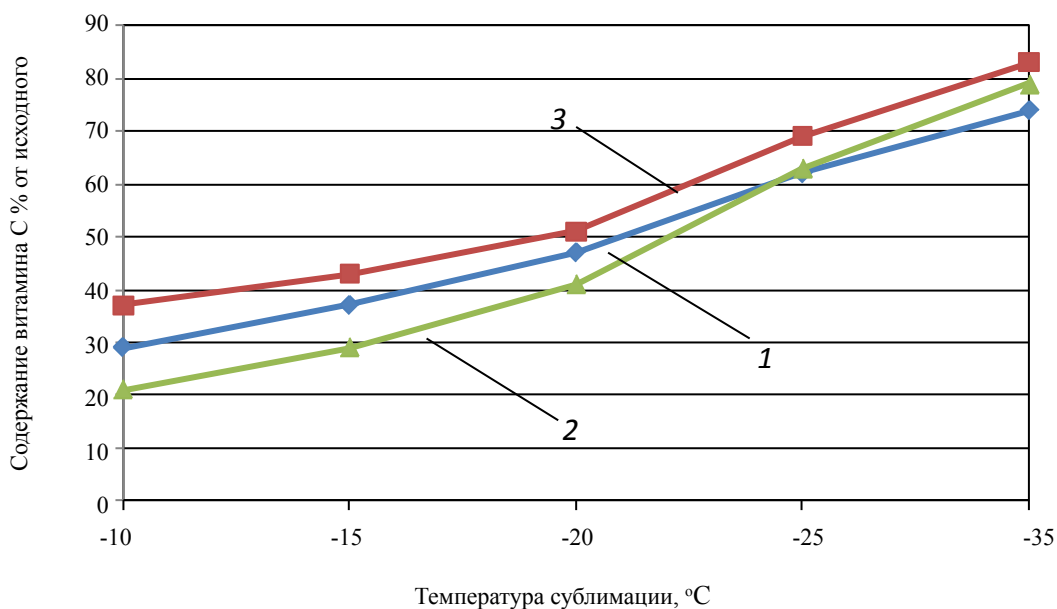


Рис. 3. Усредненный показатель уровня сохранности витамина С в яблоках при сублимационной сушке с различными температурами фазового перехода «лед — пар»: 1 — собственные эксперименты; 2, 3 — обобщенные показатели других авторов [1, 2, 4]

Таблица 1

Параметры процесса вакуумной сублимационной сушки сырья растительного происхождения в установке УВС — 80М

Температура сублимации, °С / давление в камере, Па	Средняя температура на поверхности десублиматора, °С	Длительность сушки, ч		Интенсивность влагоудаления на этапе сублимации, кг/ (ч·м²)	Удельная тепловая нагрузка, кВт/м² (% от максимальной нагрузки)
		общая	Этапа сублимации		
1	2	3	4	5	6
-10/250	-20	7,5	5,5	1,61	1,26 (100)
-15/160	-26	10	8	1,1	0,88 (70)
-18/120	-30	13	10	0,88	0,69 (55)
-25/54	-38	16	12	0,73	0,58 (46)
-30/38	-44	22	15	0,59	0,46 (36,5)

объектов сушки является изменение их линейных размеров пропорционально температуре сублимации. По данным А. В. Лыкова, усадка яблок, нарезанных кольцами диаметром 50–60 мм, при повышении температуры сублимации от -25 до -5 °С возрастает на доли миллиметра [3]. Эта небольшое отличие в диаметре долек яблока влечет за собой весьма существенную разницу в уменьшении размеров микрокапилляров их ткани. Отмеченные закономерности имеют место не только при сушке яблок, но и характерны практически для всего ассортимента сырья растительного происхождения [2, 5–7, 21]. На рис. 4 показаны фотографии микроструктуры клубники, сушка которой осуществлялась при температурах сублимации -30 °С и -70 °С. Более низкие температуры привели к формированию пористой структуры с существенно меньшими диаметрами капилляров. Авторы отмечают, что при температуре сублимации -70 °С изменения комплекса органолептических и структурно-механических характеристик минимальны [22].

Однако в условиях современных экономических реалий взаимосвязь качества продукта с температурой су-

блимации следует рассматривать только в комплексе с затратами энергии на сушку, конструкцией холодильных машин и вакуумных насосов, длительностью цикла сушки. В табл. 1 представлены режимные параметры проведенных экспериментов по сублимационной сушке. Для повышения информативности и наглядности даны усредненные данные по итогам нескольких повторяющихся сушек фруктов. В установку всякий раз загружали примерно 70 кг сырья. Средние значения начальной и конечной влажности сырья составляли соответственно 88% и 1,7%, криоскопическая температура составляла -1,3 °С. Согласно расчетам по общепринятой методике, масса удаляемой за цикл сушки влаги при этом составляла 62 кг. Далее эта цифра использована при расчете интенсивности влагоудаления фазовым переходом «лед — пар». Для этого масса удаленной влаги соотносилась с длительностью этапа сублимации (табл. 1, столб. 4) и нормировалась по площади загрузки сырья, в нашем случае 7 м² (табл. 1, столб. 5). Тепловую нагрузку на холодильную машину десублиматора определяли умноже-

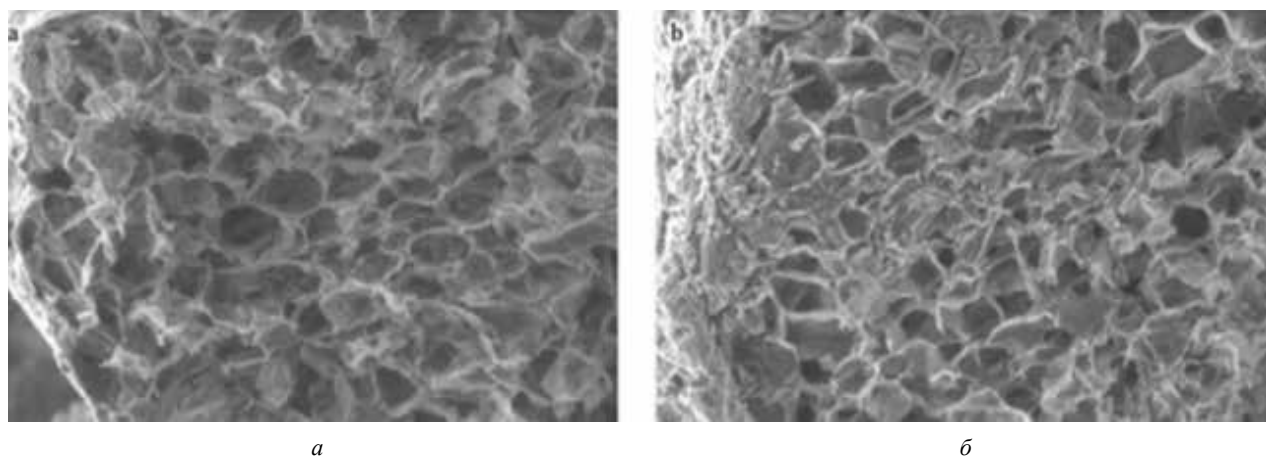


Рис. 4. Микроструктура высушенной сублимацией клубники при температурах фазового перехода «лед — пар»: а — при -30 °С; б — при -70 °С. (Сканирующий микроскоп FEI, увеличение $50\times$)

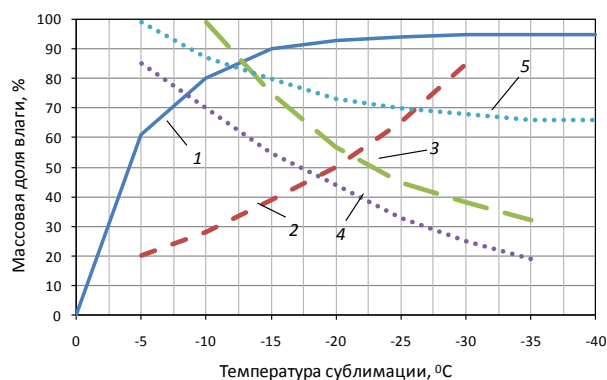


Рис. 5. Взаимосвязь температуры сублимации t_c с количеством влаги, удаляемой фазовым переходом «лед — пар» (кривая 1), длительностью сушки (кривая 2), затратами энергии на сублимацию/десублимацию влаги (кривая 3), изменением производительности холодильной машины десублиматора (кривая 4), изменением энергопотребления холодильной машины (кривая 5)

нием часовой интенсивности влагоудаления на справочные данные по величине удельной теплоты фазового перехода «лед — пар» при каждой конкретной температуре сублимации (табл. 1, столб. 6). Строго говоря, при расчете тепловой нагрузки следовало раздельно учитывать количество льда, удаляемого при данной температуре фазовым переходом «лед — пар» и количество связанной влаги, удаляемой испарением. Соотношение этих величин при различных температурах для сырья растительного происхождения показано на рис. 4, кривая 1. Эта зависимость наиболее точно может быть определена экспериментально с использованием метода дифференциального термического анализа, либо расчетным путем для предварительных оценок по выбору режимных параметров [1, 5].

Однако удельные величины теплоты фазового перехода «лед — пар», например, 2876 кДж/кг при -18 °С, и теплоты испарения связанной влаги для капиллярно-пористых тел (~ 2950 – 2995 кДж/кг) близки по своим значениям [13, 23]. С учетом того, что количество влаги с высокой энергией связи в растительном сырье составляет

несколько процентов, в наших расчетах мы ее отдельно не учитываем.

Результаты расчетов дополнительно проиллюстрированы на рис. 5. Представленные на нем данные по изменению холодопроизводительности холодильной машины паспортной мощностью 12 кВт, работающей на фреоне R-22 при температуре конденсации 30 °С, а также изменения потребляемой при этом электрической мощности на привод компрессора, взяты из справочной литературы [12, 24].

Как следует из данных, представленных в табл. 1 и на рис. 5, понижение температуры сублимации с -10 до -30 °С приводит к увеличению длительности сушки с $7,5$ до 22 ч. При этом, пропорционально снижению удаляемой в единицу времени массы льда из объекта сушки, в $2,7$ раза снижается и расчетная нагрузка на холодильную машину (кривая 3). Согласно справочным данным, снижение холодопроизводительности, используемой в сублимационной установке УВС-80М холодильной машины, составляет 65% , а отбираемая из сети мощность на привод компрессора уменьшается только на 35% (кривые 4, 5, рис. 5). Аналогичная ситуация имеет место и при изменении производительности вакуумных насосов в соотношении с изменением потребляемой электроэнергии на привод их электродвигателей для достижения все более глубокого вакуума [25].

Полученные результаты позволяют сделать важные для промышленного производства выводы.

1. Сушка при все более низких температурах сублимации ведет к увеличению общих энергозатрат. Например, при температуре сублимации -10 °С удельный расход электроэнергии составляет $2,4$ – $2,8$ кВт·ч/кг удаленной влаги. При понижении температуры сублимации до -30 °С этот показатель возрастает до $3,5$ – $3,7$ кВт·ч/кг удаленной влаги. Численные значения получены на основании реальных замеров потребляемой электроэнергии в различных промышленных сублимационных установках. Аналогичные результаты, получаемые расчетным путем, подтверждают эту закономерность.

2. Все более низкие температуры сублимации приводят не только к увеличению длительности сушки, но и с определенного момента влекут за собой необходи-

мость перехода от одноступенчатых к двухступенчатым или каскадным холодильным машинам, а также более совершенным вакуумным насосам. Это приводит к росту капитальных и эксплуатационных затрат.

3. В практике промышленного производства сублимированных продуктов из растительного сырья рациональным диапазоном температур сублимации считается температурный диапазон соответствующий перегибу на кривой зависимости доли вымороженной влаги от температуры. В нашем примере (кривая 1, рис. 5) этот диапазон температур составляет от -8 до -15 °С. На этом участке заканчивается кристаллизация влаги свободной и влаги с малой энергией связи, и начинается затвердевание влаги с высокой энергией связи, количество которой в большинстве продуктов растительного происхождения не велико.

4. Увеличение продолжительности сушки приводит к пропорциональному снижению количества готовой сухой продукции в единицу времени. Это является главной причиной целесообразности сушки при максимально допустимых для каждого конкретного вида сырья температурах сублимации, выбираемых в соответствии с заданными потребителями уровнем качества готовой продукции.

5. При создании крупных промышленных производств сублимированных продуктов с широким ассортиментом перерабатываемого сырья, целесообразно сразу предусмотреть использование нескольких типов сушильных устройств. Например, качественная сушка плодов цитрусовых растений возможна при температурах сублимации -40 °С или даже несколько ниже. А для сушки яблок вполне достаточно и -10 ÷ -15 °С.

6. Как показали проведенные нами эксперименты, еще одним эффективным резервом сокращения общей длительности цикла сушки и снижения удельных энергозатрат является увеличение давления в сушильной камере до значений, превышающих давление тройной точки воды по завершению этапа удаления влаги фазовым переходом «лед — пар». Это не приводит к снижению качества большей части растительного сырья, но приводит к сокращению времени выравнивания полей влажности и температуры по всей массе высушиваемого продукта и завершению цикла.

Литература

1. Гуйго Э. И., Журавская Н. К., Каухчешвили Э. И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности. — М.: Пищевая промышленность, 1965. 265 с.
2. Гуйго Э. И., Камовников Б. П., Каухчешвили Э. И. Основные направления развития техники сублимационного консервирования пищевых продуктов // Холодильная техника. 1974. № 9. С. 6–9.
3. Лыков А. В., Грязнов А. А. Молекулярная сушка. — М.: Пищепромиздат, 1956. 270 с.
4. Поповский В. Г., Кондратюк Г. Б. Исследование влияния некоторых структурных характеристик измельченного в замороженном состоянии фруктового пюре на продолжительность сублимационной сушки // Сборник научно-исследовательских работ. — Кишинев: МНИПП, 1971. № 11. С. 91–95.
5. Поповский В. Г., Бантыш Л. А., Ивасюк Н. Т. Сублимационная сушка пищевых продуктов растительного происхождения. — М.: Пищевая промышленность, 1975. 335 с.
6. Семенов Г. В. Вакуумная сублимационная сушка. — Москва: Дели плюс, 2013, 264 с.
7. Maffei S., Brevini T. A. L., Gandolfi F. Freezing and Freeze-Drying: The Future Perspective of Organ and Cell Preservation. Stem Cells in Animal Species: From Pre-clinic to Biodiversity, Stem Cell Biology and Regenerative Medicine, 2014, p. 167–184.
8. Панфилов В. А. Теоретические основы пищевых технологий. В 2-х книгах. Книга 2, — М.: КолосС, 2009. 800 с.
9. Антунов С. Т., Шахов А. С. Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки гранулированных продуктов. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 3. С. 56–60. DOI: 10.20914/2310-1202-2016-3-56-60
10. Бражникова А. М. Теория термической обработки мясopодуков. — М.: Агропромиздат, 1987. 271 с.
11. Гухман А. А. Об основаниях термодинамики. — М.: Энергомашиздат, 1986. 384 с.
12. Постольски Л., Груда З. Замораживание пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1978. 608 с.
13. Энергия связи воды. Справочник химика 21. [Электронный ресурс] — <http://chem21.info/info/1154685/>
14. Stephan P., Schaber K. Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme. 19 Auflage. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 566 p.
15. Stephan P., Schaber K. Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme. 19 Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
16. Hui Y. H. Handbook of Food Science, Technology, and Engineering. Volume 1–4, part 1, Broken Sound Parkway NW, Suite 300, CRC Taylor and Francis, 2006. 1516 p.
17. Антунов С. Т., Журавлев А. В., Нестеров Д. А., Марухин А. С. Алгоритм управления процессом сушки дисперсных материалов в аппарате с закрученными потоками теплоносителя и свч-энергоподводом. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015; (1):86–89.
18. Семенов Г. В., Буданцев Е. В., Краснова И. С. Антиоксидантная активность растительного сырья в процессах замораживания и вакуумного обезвоживания. // Вестник Международной академии холода. 2014. № 4. с. 19–21.
19. Пойманов В. В., Яценко С. М., Барыкин Р. А. Исследование процесса вакуум-сублимационной сушки бактериальных концентратов для мясной отрасли с использованием криозамораживания. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016; (1):25–30. DOI:10.20914/2310-1202-2016-1-25-30
20. Clark J. Peter. Freeze Drying. Case Studies in Food Engineering. Food Engineering Series 2009, pp. 67–73.
21. Patel S. M., Pikal M. J. Emerging Freeze-Drying Process Development and Scale-up Issues. AAPS PharmSciTech. March 2011, Vol. 12, Is. 1, pp. 372–378.
22. Ciurzynska A., Lenard A. Freeze-drying — Application in Food Processing and Biotechnology — A Review. Pol. J. Food Nutr. Sci., 2011, Vol.61, No 3, p. 165–171.
23. Кноппе Д. Г., Эмануэль Н. М. Курс химической кинетики. 4-е издание. — М.: Высшая школа, 1984. 463 с.
24. Быков А. В и др. Холодильные компрессоры. Справочник. — М.: Лег. и пищ. пром-сть», 1981. 280 с.

25. Walter Umrath. Fundamentals of vacuum technology, Leybold Vacuum, Köln, 1998, 250 c.

References

1. Guygo E. I., Zhuravskaya N. K., Kauhcheshvili E. I. Freeze drying in the food industry. Moscow, Food Industry, 1965. 265 p. (in Russian)
2. Guygo E. I., Kamovnikov B. P., Kauhcheshvili E. I. The main directions of the art sublimation food preservation. *Kholodil'naya tekhnika*. 1974. No 9. P. 6–9. (in Russian)
3. Lykov A. V., Grjaznov A. A. Molecular drying. Moscow, Pishchepromizdat, 1956. 270 p. (in Russian)
4. Popovski V. G., Kondratyuk G. B. Investigation of the influence of some structural characteristics of ground frozen fruit puree for the duration of the freeze drying. *Coll. NCI*. Chisinau: MNIPP, 1971. Vol. 11. P. 91–95. (in Russian)
5. Popovski V. G., Bantysh L. A., Ivasjuk N. T. Freeze drying of food products of plant origin. — M.: Food Industry, 1975. — 335 p. (in Russian)
6. Semenov G. V. Vacuum freeze drying. Moscow, Delhi plus, 2013, 264 p. (in Russian)
7. Maffei S., Brevini T. A. L., Gandolfi F. Freezing and Freeze-Drying: The Future Perspective of Organ and Cell Preservation. *Stem Cells in Animal Species: From Pre-clinic to Biodiversity, Stem Cell Biology and Regenerative Medicine*, 2014, pp 167–184
8. Panfilov V. A. Theoretical Foundations of Food Technology. Book 2, Moscow, KolosS, 2009. P. 800. (in Russian)
9. Antipov S. T., Shakhov A. S. Modelling of the granular products vacuum freeze-dried process. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2016; (3):56–60. (in Russian)
10. Brajnikov A. M. The theory of thermal processing of meat products. Moscow, Agropromizdat, 1987. 271 p. (in Russian)
11. Gukhman A. A. On the basis of thermodynamics. Moscow, Energomashizdat, 1986. 384 p. (in Russian)
12. Postolski L., Grude Z. Freezing foods. Moscow, Food Industry, 1978. 608 p. (in Russian)
13. Binding energy of water. Reference chemist 21. [Electronic resource] — <http://chem21.info/info/1154685/>
14. Stephan P., Schaber K. Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme. 19 Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 566 p.
15. Stephan P., Schaber K. Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen Band 1: Einstoffsysteme. 19 Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 566 p.
16. Hui Y. H. Handbook of Food Science, Technology, and Engineering. Volume 1–4, part 1, Broken Sound Parkway NW, Suite 300, CRC Taylor and Francis, 2006. 1516 p.
17. Antipov S. T., Zhuravlev A. V., Nesterov D. A., Marukhin A. S. The control algorithm of the drying process particulate materials in the apparatus with the swirling flow of coolant and microwave energy supply. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015; (1):86–89. (in Russian)
18. Semenov G. V., Budantsev E. V., Krasnova I. S. The antioxidant activity of vegetable raw materials in the process of freezing and vacuum dehydration. *Journal of the International Academy of Refrigeration*, 2014, No 4, p. 19–21. (in Russian)
19. Poymanov V. V., Yaschenko S. M., Barykin R. A. Investigation of the process of vacuum freeze drying of bacterial concentrates for the meat industry with cryogenic freezing. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2016; (1):25–30. (in Russian) DOI:10.20914/2310-1202-2016-1-25-30
20. Clark J. Peter. Freeze Drying. Case Studies in Food Engineering. *Food Engineering Series*. 2009, pp 67–73.
21. Patel S. M., Pikal M. J. Emerging Freeze-Drying Process Development and Scale-up Issues. *AAPS PharmSciTech*. March 2011, Vol. 12, Is. 1, pp. 372–378.
22. Ciurzynska A., Lenard A. Freeze-drying — Application in Food Processing and Biotechnology — A Review. *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 2011, Vol. 61, No 3, pp. 165–171.
23. Knorre D. G., Emanuel N. M. The course of chemical kinetics. 4th edition, Moscow, Higher School, 1984. 463 p.
24. Bykov A. V. Refrigerating compressors. Directory. Moscow, Publishing house “Light and food industry”, 1981. 280. (in Russian)
25. Walter Umrath. Fundamentals of vacuum technology, Leybold Vacuum, Köln, 1998, 250 p.

О Перечне рецензируемых научных изданий*

В соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г., 1 декабря 2015 г. сформирован Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издания, текущие номера которых или их переводные версии входят хотя бы в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования Web of Science, Scopus, Astrophysics Data System, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, Agris или GeoRef считаются входящими в Перечень по отраслям науки, соответствующим их профилю.

Вестник Международной академии холода включен в Перечень по двум международным базам: Agris (Agricultural Research Information System) и Chemical Abstracts.

*На сайте ВАК, в справочной информации об изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (по состоянию на 16.01.2017) Вестник МАХ опубликован под № 355.