

Доцент А.С. Белозерцев, доцент А.В. Прибытков

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств, тел. (473) 255-38-96

Комплексное исследование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания продукта на основе форменных элементов крови убойных животных с применением СВЧ-энергоподвода

В статье представлены комплексные исследования вакуум-сублимационного обезвоживания продукта на основе форменных элементов крови убойных животных.

The article presents a comprehensive study of vacuum sublimation dehydration of the product based on blood corpuscles of slaughtered animals.

Ключевые слова: вакуум-сублимационная сушка, самозамораживание, энергоподвод.

Исследование процесса сублимационной сушки не сводится только к определению кривых сушки и скорости. Необходимо рассматривать комплекс показателей, определяющих общую продолжительность процесса обезвоживания, так как на продолжительность процесса сублимационной сушки с применением СВЧ-энергоподвода влияет ряд показателей, а именно: способ замораживания продукта, коэффициент расширения продукта и т. д.

В зависимости от технологии сушки и физико-химических свойств объекта применяют либо предварительное замораживание, либо испарительное замораживание.

Главное явление при замораживании пищевых продуктов – фазовое превращение воды в лед. Так как в воде растворены различные минеральные и органические вещества, понижение температуры сопровождается изменением концентрации растворов, что в свою очередь изменяет температуру замерзания или криоскопическую температуру вещества [2].

Экспериментальные исследования проводились с целью выявления продолжительности процесса замораживания, при изменении исходной влажности исследуемого продукта.

Согласно полученным данным (рисунок 1), при предварительном замораживании с уменьшением влажности образца продукта массой 50 г наблюдается сокращение времени замораживания на 48 % (кривые 2...4), а при использовании испарительного замораживания по сравнению с обычным длительность процесса сокращается в примерно в 3,5 раза (кривые 1, 2).

На кривых 2...4 (рисунок 1) можно выделить три характерных участка. Первый – участок начального или предкристаллизационного охлаждения, где наблюдается небольшой перегиб на кривой замораживания перед началом кристаллизации, которому соответствует второй участок – горизонтальная площадка. Третий участок – участок переохлаждения замороженного материала.

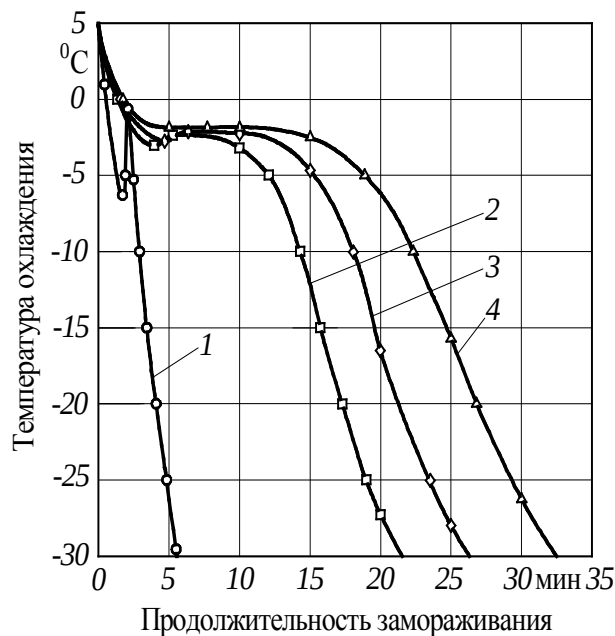


Рисунок 1 – Зависимость продолжительности замораживания от способа организации процесса и начальной влажности:

- 1 – испарительное замораживание при $W^C=96\%$;
- 2 – предварительное замораживание при $W^C=96\%$;
- 3 – предварительное замораживание при $W^C=115\%$;
- 4 – предварительное замораживание при $W^C=135\%$

Опытами Е. И. Рыжовой [1] и других показано, что процесс самозамораживания материалов сопровождается переохлаждением содержащейся в них воды с последующим выделением теплоты кристаллизации, нарушающей плавный характер изменения температуры материала, что наблюдается на кривой самозамораживания 1 (рисунок 1). Появление температурного скачка можно объяснить пульсационным характером процесса. Пульсации (скачки) температур объясняются периодической миграцией влаги и ее замораживанием в капиллярах с последующим углублением зоны сублимации.

Существенным недостатком испарительного замораживания является вспенивание и разбрызгивание продукта в результате энергичного выделения газов. Однако технологические (отпадает надобность предварительного замораживания) и энергетические (теплота кристаллизации расходуется на сублимацию влаги) преимущества данного метода выдвигают задачу изыскания путей его совершенствования.

Кроме того, при организации процесса сушки в поле СВЧ лимитирующим фактором является энергоподвод ко всему объему материала, что обуславливает применение режима испарительного замораживания, при котором образуется пористая мелкокристаллическая структура продукта, суммарная поверхность испарения которого значительно больше, чем у предварительно замороженного, поэтому интенсивность последующего процесса сублимационного обезвоживания выше за счет развития площади поверхности массообмена.

Важным фактором, влияющим на продолжительность сублимационного обезвоживания в поле СВЧ, является пористость продукта, которая может быть оценена коэффициентом расширения K_v , представляющим собой отношение первоначального объема материала к конечному.

Согласно полученным данным (рисунок 2) при испарительном замораживании с повышением начальной влажности продукта наблюдается увеличение коэффициента расширения. Однако при начальной влажности W^c более 100 % происходило разбрызгивание продукта, потеря им первоначальной цилиндрической формы и образование пористой структуры с размером пор большего диаметра в сравнении с продуктом влажностью менее 100 %. В процессе испарительного замораживания наблюдалось снижение первоначальной влажности продукта на 12-17 %.

В связи с вышеизложенным предлагается:

- применять испарительное замораживание вместо предварительного, что значительно сокращает затраты на проведение процесса;

- самозамораживать продукт с максимально низкой начальной влажностью, охлажденный до температуры близкой к криоскопической, сокращая стадию перехода жидкой фазы в кристаллическую, что уменьшает вероятность разбрызгивания продукта и потери им формы.

Для анализа процесса вакуум-сублимационного обезвоживания необходимо построение кривых кинетики сушки. В вакуумных аппаратах затруднена возможность отбора проб исследуемого продукта для определения текущей влажности, поэтому для построения кривых сушки используют весы, размещаемые в сушильной камере. Полученные таким образом текущие значения массы при известной начальной и конечной влажности продукта пересчитывают в значения текущей влажности по убыли массы. При этом за основу расчета берут одно из значений влажности – начальное или конечное, а другое служит критерием точности постановки эксперимента [3, 4].

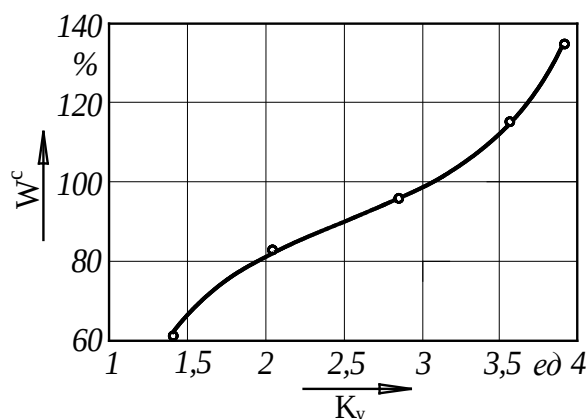


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента расширения от начальной влажности продукта

На практике при замерах возникают погрешности измерений, в основном связанные с вибрацией весов, вызванной работой вакуум-насоса и компрессора холодильной машины, что существенно влияет на характер кривых сушки.

Для устранения этого недостатка была использована методика построения кривой сушки [4], в основу расчета которой приняты оба значения измерения влажности – начальное и конечное. Это позволяет распределить погрешность эксперимента на всю длину кривой сушки, снижая ошибку при дальнейшей ее обработке.

Текущую влажность материала вычисляли по отношению массы влаги в продукте к массе абсолютно сухого:

$$W_i^C = \frac{G_i - g_c}{g_c} 100\%, \quad (1)$$

где G_i – текущая масса продукта, кг; g_c – масса сухих веществ, кг.

Данная формула позволяет получать значения текущей влажности W_i^C по экспериментальным данным текущего показания весов G_i , по которым строится кривая сушки в координатах $W^C - \tau$.

При этом массу абсолютно сухого вещества находили по формуле:

$$g_c = \left[(G^{\text{нач}} - G^{\text{кон}}) \frac{100 - W^{\text{кон}}}{W^{\text{нач}} - W^{\text{кон}}} \right] \times (1 - 0,01 W^{\text{нач}}) \quad (2)$$

где $G^{\text{нач}}$, $G^{\text{кон}}$ – показания весов соответственно в начале и конце сушки; $W^{\text{нач}}$, $W^{\text{кон}}$ – относительная влажность продукта до и после сушки.

Как говорилось выше, с увеличением начальной влажности продукта в процессе испарительного замораживания наблюдается увеличение коэффициента расширения. Однако при этом происходит образование пористой структуры материала с большим размером пор, чем у продукта с большим содержанием сухих веществ. Поэтому нам представляется интересным исследование влияния начальной влажности продукта на продолжительность сублимационного обезвоживания.

По мнению ряда авторов, увеличение начальной влажности продукта ведет к увеличению количества влаги, которую необходимо удалить сублимацией, а, следовательно, и к увеличению времени сушки [2].

Однако в трудах [1, 5] указывается на то, что увеличение исходной концентрации сухих веществ может усложнить удаление влаги из материала.

С целью выявления зависимости между продолжительностью сушки и концентрацией сухих веществ в продукте была поставлена серия экспериментов. Сушка проводилась при условиях нагрева продукта до температуры 36°C , превышение которой приводит к губительному воздействию на термолабильный продукт. Сушку проводили без предварительного замораживания продукта при следующих режимных

параметрах процесса: напряженность электромагнитного поля $E = 3,5 \text{ кВ/м}$; остаточное давление $p = 65 - 80 \text{ Па}$; температура -40°C . Такой выбор напряженности поля связан с тем, что дальнейшее ее увеличение приводило к возникновению “коронных” разрядов, вызывавших неравномерный нагрев и порчу продукта. Исследуемый продукт с различным содержанием сухих веществ правильной цилиндрической формы массой 50 г предварительно самозамораживали.

На рисунке 3 представлены кривые сушки и кривые скорости сушки исследуемого продукта с начальной влажностью $W^C 82,5 \%$, 101% , 118% .

Из кривых сушки видно, что начальная влажность в незначительной степени влияет на продолжительность сушки (33 мин. при начальной влажности $W^C = 82,5 \%$ и 40 мин. при $W^C = 118 \%$). Это объясняется малой разницей в количестве испаряемой влаги, так как масса воды в продукте практически равна или немного больше массы сухих веществ. Также, увеличение количества испаряемой влаги в более влажном продукте компенсируется увеличением продолжительности сушки менее влажного препарата в связи со снижением выделяемой в нем энергии за счет внутренних источников тепла.

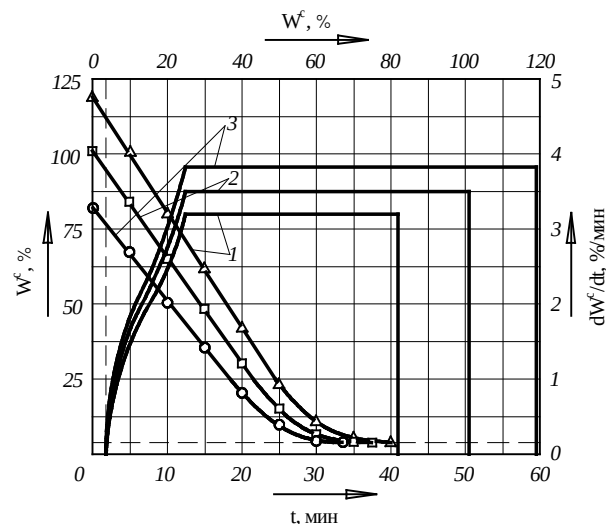


Рисунок 3 – Кривые сушки и скорости сушки исследуемого продукта при различной начальной влажности W^C , %: 1 - $W^C=82,5 \%$; 2 - $W^C=101 \%$; 3 - $W^C=118 \%$

Продолжительность периода вакуумной досушки (удаляется невымороженная влага, период падающей скорости сушки – после точки перегиба выпуклостью к оси ординат) при различной концентрации сухих веществ в исследуемом продукте практически не раз-

личается. Это объясняется тем, что на данном этапе сушки суммарная поверхность сублимации высушиваемых образцов продукта разной начальной влажности практически одинакова.

Для сравнительного анализа эффективности процесса сушки проведены экспериментальные исследования (рисунок 4) при различных способах замораживания. Как видно из приведенных графиков, временной интервал процесса сушки при самозамораживании до заданной влажности резко отличается, даже если исключить время предварительного замораживания одного из образцов.

Поэтому общая продолжительность цикла обезвоживания при использовании испарительного замораживания сокращается на 60-65 %.

Рассмотрим механизм обезвоживания исследуемого продукта правильной цилиндрической формы диаметром 12,5 мм и массой 50 г., предварительно замораживаемого в камере холодильного стола НС 280-70 "Frigera" с начальной влажностью 96 % до конечной температуры -30°C . В случае испарительного замораживания свободная влага интенсивно испаряется из образца (удаляется 12 - 17 % влаги), при этом температура продукта непрерывно снижается (кривая 2, рисунок 4). Далее начинается сублимация льда с поверхности, температура продукта снижается и достигает (-30°C) . После включения магнетронов самозамороженный продукт практически мгновенно прогревается по всему объему, вследствие чего процесс сублимации значительно интенсифицируется. В течение периода постоянной скорости сушки происходит интенсивная сублимация влаги (удаляется порядка 55-60 % влаги), температурный градиент по толщине материала (температура в нижнем слое $(-10) - (-20)^{\circ}\text{C}$, на поверхности $(-12) - (-23)^{\circ}\text{C}$) практически отсутствует. Скорость сушки при испарительном замораживании в первом периоде немного больше, чем у предварительно замороженного образца, вследствие более развитой поверхности сублимации.

В процессе сушки предварительно замороженного образца (кривая 1, рисунок 4) наблюдается ярко выраженный период прогрева (период развития объемной сублимации), кривая сушки обращена вогнутостью к оси абсцисс. Этот период характеризуется непродолжительной по времени сублимацией влаги с геометрической поверхности высу-

шиваемого образца, в след за чем происходит развитие зоны сублимации по толщине образца и начинается объемное испарение влаги в образующиеся щели, микротрещины и полости продукта.

Период вакуумной досушки (удаляется невымороженная влага, период падающей скорости сушки) при различном способе замораживания практически не различается. Это связано с тем, что к данному моменту суммарная площадь поверхности сублимации образцов выравнивается и становится практически одинаковой.

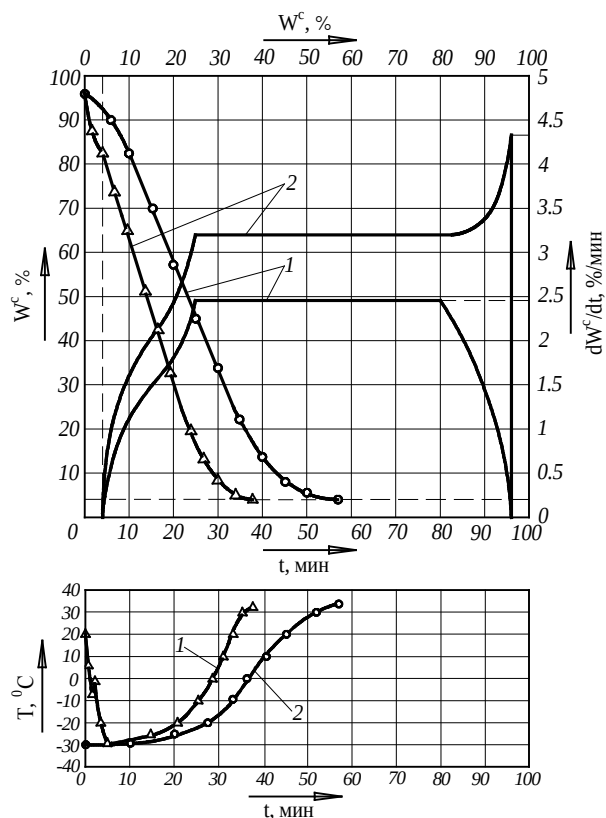


Рисунок 4 - Кривые сушки, скорости сушки и термограмма обезвоживания исследуемого продукта при различных способах замораживания:
1 – предварительное замораживание;
2 – испарительное замораживание

На наш взгляд является интересным исследование влияния напряженности электромагнитного поля на продолжительность обезвоживания исследуемого продукта. С целью выявления данной закономерности была проведена серия опытов, результаты которых представлены на рисунке 5.

Сушка при различной мощности источников СВЧ-излучения (магнетронов) и как следствие – разной напряженности поля: соответственно 2,5; 3 и 3,5 кВ/м.

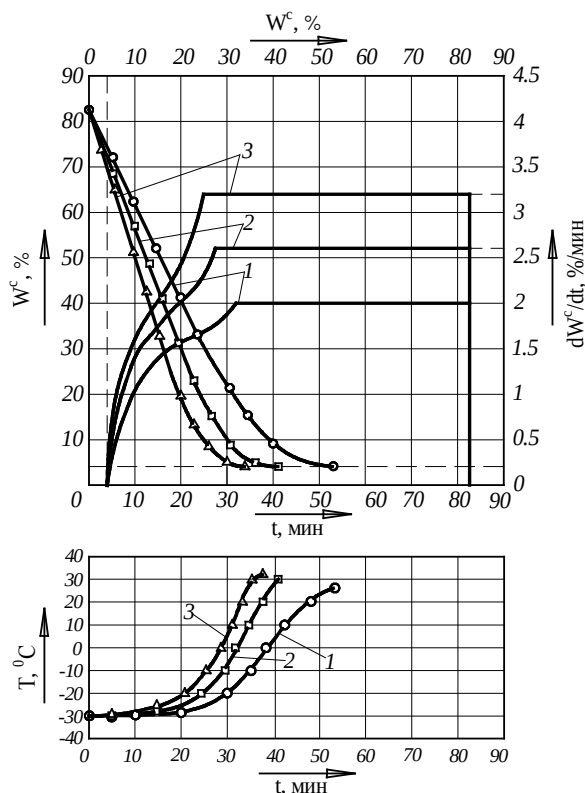


Рисунок 5 - Кривые сушки, скорости сушки и термограмма обезвоживания исследуемого продукта при различной напряженности электромагнитного поля: 1 – $E=2,5$ кВ/м; 2 – $E=3,0$ кВ/м; 3 – $E=3,5$ кВ/м.

Из рисунка 5 видно, что с увеличением напряженности электромагнитного поля время сушки уменьшается. Однако дальнейшее увеличение мощности, как говорилось выше, приводит к возникновению “коронных” разрядов и порче продукта. Также по характеру кривых можно судить о незначительном снижении периода падающей скорости сушки с увеличением напряженности поля и большему нагреву продукта по окончании процесса сушки.

В связи с вышеизложенным предлагается:

- осуществлять процесс вакуум-сублимационной сушки с использованием испарительного замораживания;
- проводить процесс сушки при напряженности электромагнитного поля $E = 3,5$ кВ/м.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гуйго, Э. И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности [Текст] / Э. И. Гуйго, Н. К. Журавская, Э. И. Каухчешвили. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 434 с.
- 2 Лебедев, Д. П. Тепло- и массообмен в процессах сублимации в вакууме [Текст] / Д.П. Лебедев, Т. Л. Перельман. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
- 3 Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
- 4 Николаенко, С. В. Повышение эффективности сублимационной сушки ферментных препаратов [Текст]: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.18.12 / С. В. Николаенко. – Воронеж, 1990.
- 5 Поповский, В. Г. Сублимационная сушка пищевых продуктов растительного происхождения [Текст] / В. Г. Поповский. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 337 с.

REFERENCES

- 1 Guygo, E. I. Freeze drying in the food industry [Text] / E. I. Guygo, N. K. Zhuravskaya, E. I. Kauhcheshvili. – M.: Pishhevaya promyshlennost, 1972. - 434 p.
- 2 Lebedev, D. P. Heat and mass transfer in the process of sublimation in vacuum [Text] / D. P. Lebedev, T. L. Perelman. – M.: Energiya, 1973. – 336 p.
- 3 Lykov, A. V. Theory of drying [Text] / A. V. Lykov. – M.: Energiya, 1968. - 471 p.
- 4 Nikolaenko, S. V. Towards improved freeze-dried enzyme preparations [Text]: abstr. diss.... PhD: 05.18.12 / S. V. Nikolaenko. – Voronezh, 1990.
- 5 Popovski, V. G. Freeze drying of plant origin foods [Text] / V. G. Popovski. – M.: Pishhevaya promyshlennost, 1975. – 337 p.