

УДК 664.161.33

Занкевич В.А., кандидат физико-математических наук,
Коротинский В.А., кандидат технических наук, доцент, Синица С.И., Коховец Ж.А.
Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск

К ВОПРОСУ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВАКУУМ-СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Вакуум-сублимационная сушка (сушка вымораживания или возгонка) широко применяется в химической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности [1]. Общеизвестно, что сублимационная сушка в вакууме позволяет получать высушенный продукт наилучшего качества. Данный высушенный продукт легко увлажняется, практически сохраняя пищевую и биологическую ценность исходного сырья, более стойкий при хранении. В [2] приводятся требования к технологии сублимационной сушки термолабильных материалов, влияющие на качество высушенных продуктов. Отмечено, что к основным проблемам, влияющим на качество высушенного продукта относятся: а) повреждения целостности клеток пищевого продукта при замораживании; б) потери вкусоароматических соединений; в) разная способность к регидратации. Качество высушенного продукта зависит также от качества исходного сырья и первоначальной обработки перед замораживанием. В основе подхода используется концепция стеклования, которая получила применение в пищевой промышленности в конце XX века. Основное требование к сублимационной сушке состоит в том, что термолабильный материал в процессе сушки должен находиться все время в стеклообразном состоянии [2].

Основным недостатком вакуум-сублимационной сушки является большая длительность процесса сушки и высокие энергозатраты. С целью энергосбережения и интенсификации процесса в последние десятилетия широко используются альтернативные варианты данного метода сушки: вакуумная сушка с последующей сублимационной сушкой в едином цикле [3], атмосферная сублимационная сушка в псевдосжиженном слое с помощью холодного воздуха, распылительная сублимационная сушка, микроволновый нагрев [2].

Вакуум-сублимационную сушку (ВСС) пищевых продуктов проводят ниже тройной точки воды $p = 610,15 \text{ Па}$, $T = 273,15 \text{ К}$ при давлениях порядка $10\text{--}100 \text{ Па}$ [1-4]. Известно, что интенсивность парообразования чистого льда в процессе ВСС ниже интенсивности аналогичного процесса в термолабильном материале, имеющем пористую капиллярную структуру [1]. Следует отметить, что сублимация – это фазовый переход из твердой фазы (лед) в газообразную (сухой перегретый водяной пар) и давление пара вблизи твердой поверхности всегда ниже равновесного. Данный переход относится к фазовому переходу I-го рода, сопровождающему скачками энтропии и объема $\frac{v_n}{v_n} = f(p_s)$, (например, при испарении 1 кг льда при $p_s = 133 \text{ Па}$ образуется $v_n = 10^3 \text{ м}^3$ пара, а при $13,3 \text{ Па}$ соответственно $v_n = 10^4 \text{ м}^3$) и характеризуется поглощением скрытой теплоты образования газообразной фазы. Сублимация протекает с внешней затратой энергии, равной скрытой теплоте сублимации. Теплота сублимации в условиях равновесного фазового перехода «лед-пар» определяется из уравнения Клаузиуса-Клапейрона.

Принципиальная схема вакуум-сублимационной сушки состоит из следующих основных элементов: сублиматора (вакуумная сушильная камера); устройства для подвода теплоты в сублиматор; конденсатора для удаления пара из сублиматора; системы вакуумных насосов для удаления воздуха и водяного пара из сублиматора и конденсатора.

Важным этапом процесса ВСС является замораживание. В зависимости от свойств высушиваемого материала применяют один из способов замораживания: а) предварительное замораживание вне сушильной камеры и замороженный материал помещают в сублиматор;

б) самозамораживание в сублиматоре за счет резкого снижения давления. Ряд требований, предъявляемых к замораживанию, рассмотрено в [2], где отмечено, что для эффективного процесса ВСС продуктов растительного и животного происхождения необходимо образование мельчайших кристаллов льда, полученных быстрым замораживанием.

Лабораторные и промышленные установки используются в основном полочного типа [1-4]. Способы энергоподвода к полкам: кондуктивный, радиационный, комбинированный. Контроль процесса сушки осуществляют по температурам на поверхностях и в центре пластины с помощью термодатчиков. Конденсатор (десублиматор) должен располагаться как можно ближе к сублиматору и температура на его поверхности T_k должна быть ниже температуры пара в сублиматоре T_s , что приводит к десублимации пара на поверхностях конденсатора. Конденсатор является испарителем холодильной машины. Давление вблизи поверхности конденсатора p_k ниже, чем давление паров в сублиматоре p_s . Интенсивность внешнего тепло- и массообмена возрастает с увеличением разности давлений $p_s - p_k$.

Скорость сублимационной сушки зависит от множества факторов: природы высушиваемого материала и связи влаги в высушиваемом материале, температуры и давления в аппарате, способа и интенсивности энергоподвода и др. [1-4]. Знание основных закономерностей кинетики процесса сушки позволяет определить время процесса в трех стадиях сушки: периоде постоянной скорости, периоде падающей скорости сушки, периоде досушивания [1, 4]. Одним из путей уменьшения времени сублимационной сушки является увеличение пористости термолабильного материала перед сушкой. Одним из способов увеличения пористости данного материала является вспенивание с быстрым замораживанием. Пенообразный материал можно получить с использованием эжектирования термолабильного материала, определенной вязкости в струе углекислого газа с последующим быстрым замораживанием. Продолжительность процесса ВСС вспененного замороженного материала значительно сокращается [2]. Данный подход использован в работе [3]. В работе затронут вопрос оценки времени вакуумной сублимационной сушки замороженного вспененного материала.

Математическое описание процесса сублимационной сушки термолабильных материалов базируется на применении к нему основных законов тепло- и массообмена с учетом фазового перехода. Практически во всех моделях предполагается, что в интенсивной области сублимации проходит условная граница фазового перехода на сухой и замороженный, и зона сублимации перемещается от поверхности вглубь материала [1-4]. Также предполагается, что процесс сушки в зоне сублимации толщиной dh является квазистационарным, т.е. описывается уравнением теплопроводности для стационарного режима. Для упрощения решения данного уравнения делается допущение, что материал является изотропным и коэффициент теплопроводности в замороженном λ_{1L} и сухом слое λ_{2C} не зависит от координат, а плотности ρ_{1L} , ρ_{2C} и удельные теплоемкости c_{1L} , c_{2C} не зависят от времени. При данных допущениях решение стационарного уравнения теплопроводности при заданных граничных условиях сводится к одномерной задаче, которая аналитически решена для плоской бесконечной пластины, цилиндра и шара [1]. Следует отметить, что биологические объекты сублимационной сушки являются анизотропными.

Для изучения кинетики сушки (переноса массы пара) используется уравнение диффузии Фика. Для несвязанной влаги в слое сублимации dh наблюдается скачок объема $\frac{v_n}{v_L}$ и давление в данном слое p_1 больше давления на поверхности сухого вещества p_s , что приводит к потоку пара в сторону поверхности сухого вещества. Общее уравнение кинетики сушки для любого метода сушки дано в работах А.В. Лыкова в 70-е годы XX века. Данное уравнение детально проанализировано применительно к ВСС в [1]. Совмещение радиационного подвода теплоты через одну поверхность пластины и кондуктивного подвода теплоты через замороженный слой второй поверхности по сравнению с радиационным подводом через одну по-

верхность и кондуктивным через осушенный слой другой поверхности пластины значительно экономит время сушки. В [1] показано, что при сушке продуктов толщиной $(15 \div 25) \cdot 10^{-3}$ м комбинированный энергоподвод можно заменить двухсторонним радиационным энергоподводом. Подход использован в [4] для расчета вакуум-сублимационных сушилок и в данной работе.

Для нашего случая выбираем бесконечную вспененную замороженную пластину толщиной dh . Способ энергоподвода двухсторонний радиационный с температурой поверхности в период падающей сушки T_s и температурой поверхности зачерненного ИК-излучателя T_{II} . Дно полки стеклянное. Движение фронта сублимации направлено от внешних поверхностей к центру пластины, а пар движется в обратном направлении. Гетерогенная пористая система заменяется гомогенной с введением поправок на пористость за счет пенообразования в коэффициенты $\lambda_{эф}$, удельной теплоемкости $c_{эф}$, плотности $\rho_{эф}$ для замороженного и сухого вещества $\lambda_{лэф}$, $\lambda_{сэф}$, $\rho_{лэф}$, $\rho_{сэф}$, $c_{лэф}$, $c_{сэф}$ и на границе фазового перехода происходит скачкообразное изменение данных параметров.

Задавая граничные и начальные условия с учетом вышесказанного и пренебрегая степенью нагрева пара и формой распределения температуры в осушенном слое, продолжительность времени сублимации

$$\tau = \frac{h^2 L \rho_{сэф}}{T_u - T_s} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{B_{эф}} \right), \quad (1)$$

где L – удельная теплота сублимации, h – полутолщина пластины, $B_i = \frac{\alpha_p h}{\lambda_{сэф}}$ – критерий Био, α_p – коэффициент теплоотдачи.

Используя подход [1, 4] установлено, что время процесса ВСС вспененного замороженного продукта на 20–30 % меньше времени аналогичного процесса не вспененного. Данные значения носят оценочный характер и зависят от объема вещества в пене. Размеры замороженных пузырьков воздуха должны быть как можно меньше.

В заключении следует отметить, что для термолабильных продуктов с содержанием сухого вещества 30–40 % вспенивание с быстрым замораживанием сокращает продолжительность процесса.

Список использованной литературы

1. Камовников Б.П. Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов (Основы теории, расчет, оптимизация)/ Камовников Б.П., Воскобойников В.А., Малков Л.С. – М.: Агропромиздат, 1985. – 288 с.
2. Бери М. и др. Замороженные пищевые продукты. Производство и реализация. – Санкт-Петербург: Профессия, 2010. – 439 с.
3. Буданцев Е.В. Интенсификация обезвоживающих жидких и пастообразных термолабильных пищевых продуктов в условиях сочетания процессов в вакууме и сублимации в едином цикле: Автореферат дис. канд. техн. наук: Д.Н.2.148.10/ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет пищевых продуктов». – Москва, 2011. – 22 с.
4. Остриков А.Н., Слюсарев М.И., Желтоухова Е.Ю. Расчет и проектирование сушильных аппаратов: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 352 с.