

Тепломассообмен в промышленных процессах вакуумного сублимационного обезвоживания с учетом условий контактирования*

Д-р техн. наук Г. В. СЕМЕНОВ, М. С. БУЛКИН

Московский государственный университет прикладной биотехнологии

109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33

Канд. техн. наук Л. Э. МЕЛАМЕД, канд. техн. наук А. И. ТРОПКИНА

ЗАО «Атомэнергомаш», 109147, г. Москва, Воронцовская ул., 23

It is considered the vacuum sublimation dehydration process of thermolabile materials situated in the glass containers under the condition of heat supply from flat heating surface. The mathematical model of dehydration process is presented. It takes into account the influence of drained carcass and its possible deformation. It is developed the methodology of influence estimation of contacting type on the duration of dehydration with regard to real industrial production conditions. It is accomplished the experiments detecting the influence estimation of contacting type between heating surface and containers with production on heat transfer by atmospheric pressure and by vacuum. The comparative calculations of vacuum sublimation process for different heat flux in contact zone are performed.

Key words: sublimation, heat-mass transfer, thermolabile materials, mathematical simulation.

Ключевые слова: сублимация, тепломассообмен, термолабильные материалы, математическое моделирование.

Введение

Процессы вакуумной сублимационной сушки в настоящее время получили наибольшее практическое применение в технологиях производства сухих лекарственных препаратов, ферментов, заквасок, биологически активных добавок (БАД) и др. В ряде случаев, например при производстве сухих легкорастворимых антибиотиков, бактерийных и вирусных препаратов, высущенных кисломолочных продуктов и т. п., сублимационная сушка пока не имеет альтернативы.

В рассматриваемой ситуации жидкие или пастообразные объекты сушки находятся в стеклянных ампулах, флаконах или чашках Петри, которые после завершения этапа предварительного замораживания размещаются на теплоподводящих плоскостях, т. е. рабочих полках, расположенных в вакуумируемом пространстве сушильных камер сублимационных установок.

В процессе сублимационной сушки тесно переплетаются между собой механические, гидродинамические, теплообменные и массообменные процессы, сопровождаемые фазовыми переходами с подвижными границами раздела фаз и меняющимися свойствами областей их первоначального расположения. Исследование явлений такого рода вызывают затруднения, связанные со сложностью, многообразием и взаимосвязанностью протекающих в них процессов, переменностью свойств материалов и продуктов и т. д.

В настоящее время известны теории и физические модели вакуумного обезвоживания жидких, пастообразных, кусковых материалов, а также методики расчета оборудования для вакуумного обезвоживания (сгущение, выпаривание продукта, вакуумная сушка пищевых продуктов и т. д.).

Накопленный аналитический материал позволяет проводить качественную оценку и характеризовать взаимовлияние всех факторов, от которых зависит интенсивность и длительность сушки. Однако существующие модели и методы расчета продолжительности цикла сушки на их основе не учитывают особенностей процесса

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 10-08-00628.

в реальных условиях. Этими особенностями являются: неодинаковые условия теплопередачи от греющих поверхностей к каждому отдельному объекту высушивания по причине различия геометрических характеристик донышек стеклянных емкостей; различные условия сопряжения этих поверхностей; наличие микрозазоров и микрошероховатостей поверхностей как стеклянных, так и теплопередающих емкостей; флуктуации теплофизических характеристик объектов высушивания. Кроме того, расположение, форма и размеры кристаллов льда, формирующихся на этапе предварительного замораживания высушиваемых объектов, достаточно индивидуальны в каждой емкости, что порождает различия в тепло- и массопроводности.

В данной работе решаются следующие задачи:

- экспериментальное исследование контакта греющей поверхности со стеклянными емкостями при атмосферном давлении и в вакууме;
- развитие математической модели совокупности процессов тепломассообмена, проходящих при вакуумной сублимационной сушке термолабильных материалов;
- реализация вышеназванной модели на основе программного комплекса «Comsol Multiphysics»;
- разработка методики расчета продолжительности цикла обезвоживания с учетом условий контактирования и проведение сравнительных расчетов процесса вакуумной сублимации;
- предложение на этой основе способа улучшения контакта в вышеуказанной зоне и проверка данного способа на разработанной расчетной модели.

Физическая модель процесса

Предварительно замороженный продукт с теплопроводностью $\lambda_{\text{пр}}$ в слое толщиной h находится в стеклянной емкости (ампуле, флаконе), расположенной на греющей поверхности с теплопроводностью $\lambda_{\text{нагр}}$ и постоянной температурой $t_{\text{нагр}}$ в вакууме (рис. 1, а). Емкость имеет теплопроводность $\lambda_{\text{ст}}$, высоту $h_{\text{ст}}$, диаметр донышка d и толщину стенки δ . Условия контактирования емкости с продуктом и греющей поверхностью таковы, что между ними имеются микрозазоры, вследствие чего площадь фактического контакта $S_{\text{к}}$ значительно отличается от площади донышка ампулы S_d . Контактное термическое сопротивление R , возникающее при таких условиях, значительно увеличивает продолжительность цикла обезвоживания τ_c .

Из-за неодинаковых условий контактирования $t_{\text{суб}}$ изменяется по толщине продукта, т. е. температура сублимации у дна отличается от температуры сублимации на поверхности. Условия контактирования внутренней части емкости и замороженного продукта будем считать идеальными.

В микрозазорах передача теплоты в вакууме осуществляется только радиационной составляющей, которая в условиях поставленной задачи численно очень мала и которую в дальнейших расчетах мы рассматривать не будем.

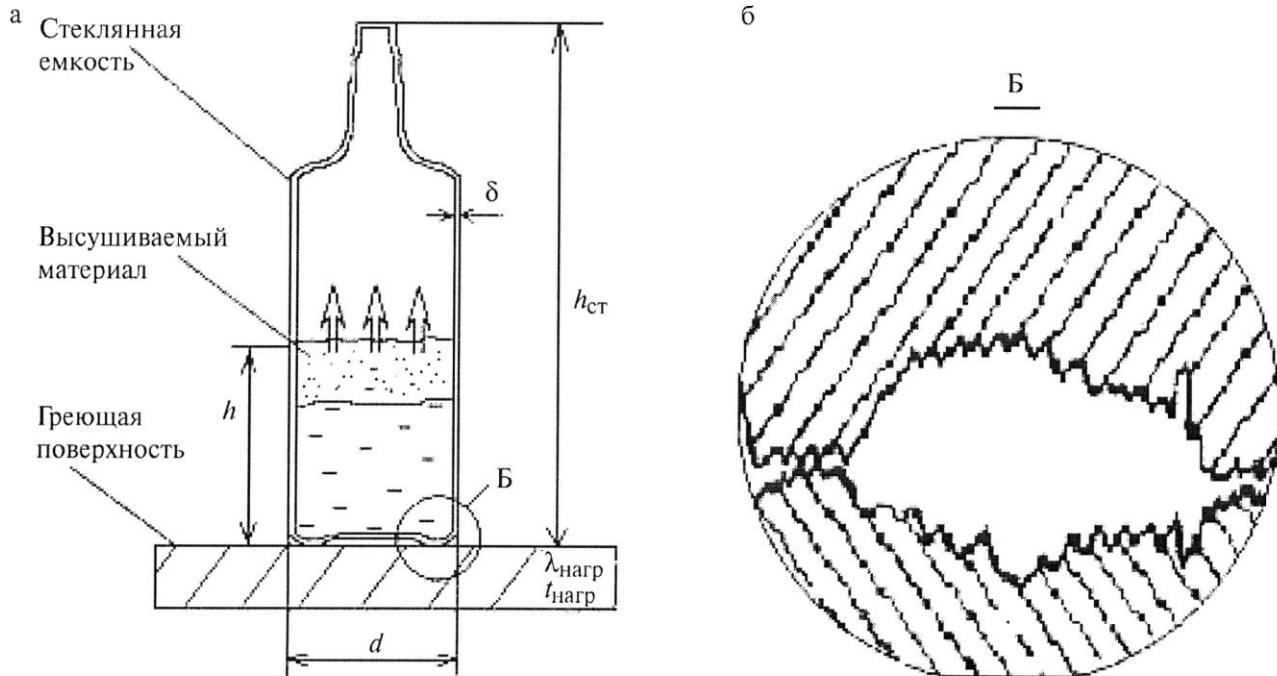


Рис. 1. Модель процесса:
а — стеклянная емкость с объектом сушки, находящаяся на греющей поверхности;
б — реальная зона контактирования «емкость—плита»

Расчет продолжительности цикла обезвоживания с учетом реальных условий контактирования

Известны аналитические зависимости для расчета продолжительности цикла обезвоживания, базирующиеся на общепринятых физических процессах сублимационного обезвоживания [1–3]. Наиболее распространена при расчетах зависимость, отражающая взаимовлияние основных факторов процесса:

$$\tau_c = \frac{r\rho}{2\lambda\Delta T} h^2,$$

где τ_c — продолжительность цикла сублимации;
 r — удельная теплота фазового перехода, кДж/кг;
 ρ — плотность льда, кг/м³;
 λ — теплопроводность замороженного слоя, Вт/(м·К);
 $\Delta T = t_{\text{нагр}} - t_{\text{суб}}$ — температурный напор, К;
 h — толщина слоя продукта, м.

Расчет по данной зависимости дает значительные отклонения от реальных значений из-за сложности определения ΔT и неучета переменности по пространству толщины продукта h . Реальная оценка численных значений температурного напора ΔT очень затруднена из-за того, что при известной температуре сублимации практически невозможно найти численные значения второй составляющей температурного напора — температуры материала в зоне его контакта с дном стеклянной емкости, которая отличается от $t_{\text{нагр}}$ из-за неравномерности контактирования.

В местах соприкосновения емкости и нагревателя возникает контактное термическое сопротивление R , которое определяет потери температурного напора в соприкасающихся телах и равняется отношению перепада температуры к плотности теплового потока: $R = 1/\alpha_k = \Delta T/q$, где α_k — термическая проводимость контакта, Вт·м²·К⁻¹. Абсолютное термическое сопротивление контакта рассчитывается по формуле $R_a = \Delta T/Q$, где Q является полным тепловым потоком, соответствующим всей поверхности.

Поверхностные и механические свойства при контакте твердых тел определяют фактическую площадь контакта, от которой зависит величина сопротивления стягивания, под которым понимается концентрация линий теплового потока в точках надежного контактирования (рис. 2).

Из-за наличия на твердых поверхностях как волнистости, так и шероховатости стягивание линий теплового потока происходит поэтапно: сначала в пределах номинальных поперечных сечений линии теплового потока стягиваются к контактным макропятнам, вызванным волнистостью, а затем в пределах каждого макропятна — к микропятнам, обусловленным шероховатостью (см. рис. 1, б) [4].

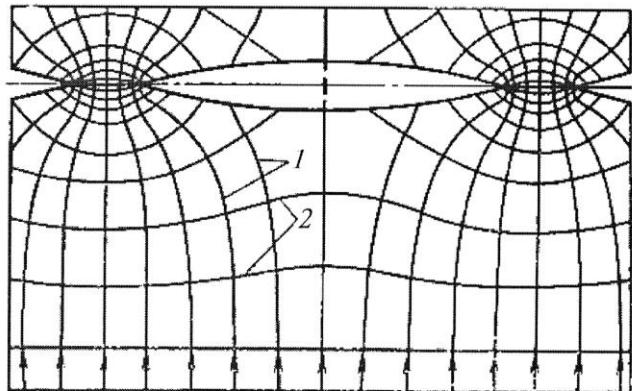


Рис. 2. Линии теплового потока и изотермы в зоне контакта:
 1 — линии теплового тока; 2 — изотермы

Существует большое количество аналитических методик для определения термического сопротивления реального контакта, связанных с возможностью физически обоснованного расчета его величины. В расчетах контактного теплообмена распространены полуэмпирические зависимости, позволяющие найти интегральное контактное термическое сопротивление без исследования особенностей его структуры [5]. Полная контактная проводимость α_k представляется как сумма значений термической проводимости через контактные пятна твердых тел $\alpha_{k, \text{тв}}$ и среду в межконтактных зазорах $\alpha_{k, \text{з}}$ (проводимостью контактных пленок в условиях поставленной задачи пренебрегаем):

$$\alpha_k = \alpha_{k, \text{тв}} + \alpha_{k, \text{з}}.$$

Процесс сублимационного обезвоживания протекает в условиях вакуума. Поэтому можно принять, что в межконтактных зазорах сопротивление среды бесконечно велико и термическая проводимость $\alpha_{k, \text{з}}$ через зазоры, представленная вторым слагаемым, равна нулю. В этом случае термическое сопротивление реального контакта

$$R = \frac{1}{\alpha_{k, \text{тв}}},$$

где $\alpha_{k, \text{тв}}$ вычисляется с помощью следующей зависимости [5]:

$$\alpha_{k, \text{тв}} = \eta_1 \lambda_{\text{ср}} \left(\frac{P_n}{H} \right)^{\eta_2} \left(\frac{m}{\sigma} \right)^{\eta_3},$$

здесь $\eta_1 = 2/\pi\chi$;

$$\eta_2 = 1 + 0,071c_2;$$

$$\eta_3 = 1;$$

$$\chi = 0,36;$$

P_n — номинальное контактное давление, Па;

H — поверхностная микротвердость, Па;

c_2 — коэффициент микротвердости по Виккерсу;

$\lambda_{\text{ср}} = 2\lambda_{\text{нагр}}\lambda_{\text{ст}}/(\lambda_{\text{нагр}} + \lambda_{\text{ст}})$ — средняя теплопроводность взаимодействующих материалов, Вт/(м·К);

$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0,5}$ — приведенная шероховатость поверхности, м;

$m = (m_1^2 + m_2^2)^{0,5}$ — средний приведенный угол микронеровности.

Для оценки необходимых для расчета величин микропшероховатости донышек используемых в реальном промышленном производстве стеклянных ампул и фляконов нами была выполнена серия экспериментов на атомно-силовом микроскопе. Эти эксперименты позволили определить численные значения параметров микропшероховатости, которые и были использованы в расчетах.

Приведенные выше зависимости позволяют осуществить численную оценку реального термического сопротивления в зоне контакта. Однако для определения температурного напора, обеспечивающего теплопередачу от дна к фронту фазового перехода, этого недостаточно.

Дальнейшим основным этапом нашей работы стало экспериментальное определение теплового потока от греющей поверхности к рассматриваемым емкостям; были проведены эксперименты, в которых использовались различные модификации зоны контакта.

Экспериментальное исследование условий теплопереноса в зоне контакта между греющей поверхностью и теплоприемником

Флякон, частично заполненный модельным телом, располагается на плоской греющей поверхности. Эта

поверхность представляет собой алюминиевую пластину, нагреваемую снизу никромовыми спиралью. На нагревателе (греющей поверхности) в непосредственной близости (на расстоянии 5 мм) от флякона размещены хромель-алюмелевые термопары.

Высота слоя продукта во фляконе была равна 40 мм. Термопары находились в продукте на расстоянии $h = 20$ мм от дна. Заполненный модельным телом флякон в течение некоторого времени находился в камере, и тело приобретало температуру окружающей среды (порядка 23 °C). После этого флякон помещался на нагреватель, температура которого выдерживалась в пределах 46–48 °C. Стеклянная емкость с веществом и термопарой схематично показана на рис. 3.

Температура или тепловой поток от греющей поверхности ко дну флякона и затем к продукту преодолеваются значительные термические сопротивления, что сказывается на длительности процесса. Цель эксперимента — определение величины этих сопротивлений и их влияния на длительность обработки продукта. Основой дальнейшего анализа являются результаты проведенных нами экспериментов.

На рис. 4 показана условная зона контакта дна флякона с греющей поверхностью. Такие условия контактирования предложены нами на основе статистической обработки размеров пятен контакта, образовавшихся в результате контактирования порядка ста окрашенных донышек реальных фляконов данного типа с плоской металлической поверхностью. Показано также осевое сечение флякона в зоне контакта.

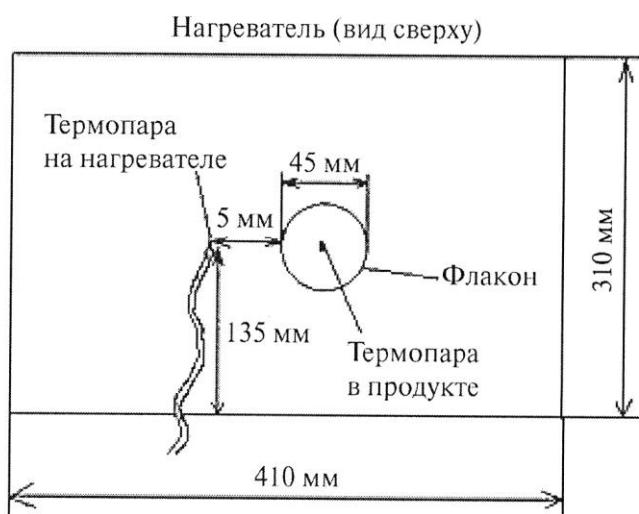
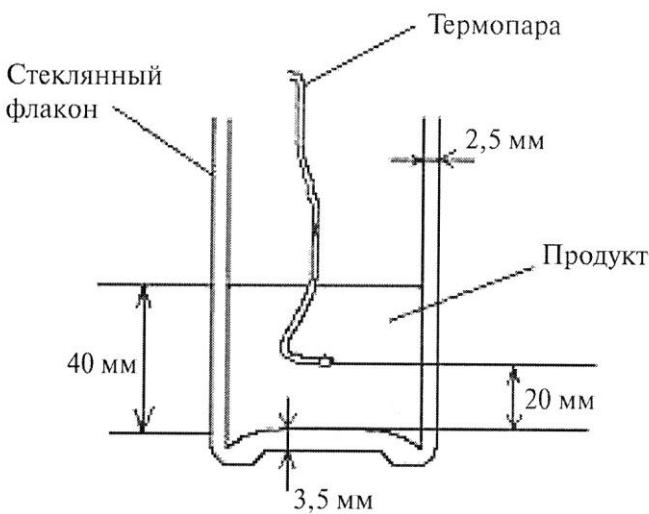
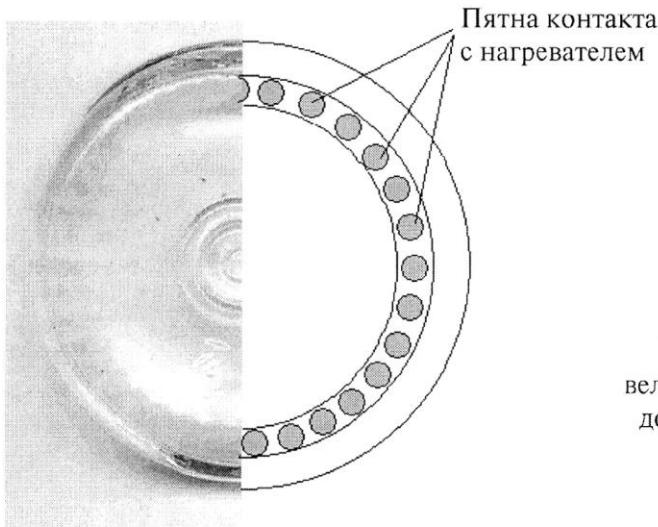


Рис. 3. Флякон с термопарой и его размещение на греющей поверхности

а

Донышко флакона



б

Рис. 4. Зона контакта флакона с греющей поверхностью:
а — вид снизу; б — осевое сечение

Первым этапом было проведение экспериментов с такими условиями контактирования, которые имеют место в реальных установках с кондуктивным энергоподводом, широко применяемых в фармацевтических производствах. На втором этапе для количественных оценок влияния реальных условий теплопередачи нами проведена серия экспериментов, в которой были смоделированы условия теплопередачи, близкие к идеальным. Микрозазоры были заполнены материалом с высокой теплопроводящей способностью (пасты на основе спеченного мелкодисперсного порошка меди с теплопроводностью, близкой к $200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [6]). На третьем этапе моделировался прямой контакт материала с греющей поверхностью, здесь определялся полный тепловой поток при отсутствии контактного сопротивления.

Эксперименты сводились к сравнению между собой трех случаев конфигураций контакта. Первая конфигурация была исходной — флакон на греющей поверхности. Вторая конфигурация повторяла первую, но при наличии теплопроводящего вещества, заполняющего зазоры. Наконец, третья конфигурация являлась предельно возможной с точки зрения теплопередачи; это был прямой контакт греющей поверхности с нагреваемым материалом при отсутствии и донышка, и пасты.

Вначале в качестве нагреваемого материала в экспериментах применялись реальные пищевые материалы (такие, например, как йогурт), однако из-за существенной неопределенности и изменчивости их теплофизических свойств был применен парафин. Парафин — это смесь высокомолекулярных углеводородов, получаемая

при перегонке нефти. Он представляет собой белую массу крупнокристаллической структуры с температурой плавления $45\text{--}52^\circ\text{C}$, температурой кипения 350°C . Парафин имеет следующие теплофизические свойства [7]: плотность $\rho = 790 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость $c = 2260 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, теплопроводность $\lambda = 0,268 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, температуропроводность $a = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Парафин в жидком состоянии заливается в стеклянную емкость (флакон), в котором уже находилась термопара.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении и в вакууме (при давлении 30–100 Па). Значения температур регистрировались каждые 2 мин в течение часа. Результаты экспериментов отображены на рис. 5.

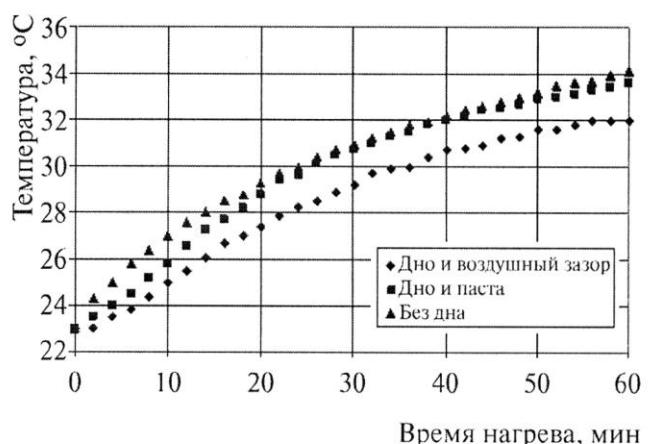


Рис. 5. Зависимость температуры продукта от времени нагрева

Последовательность экспериментальных кривых соответствует трем условиям теплопередачи в зоне контакта при атмосферном давлении и в вакууме. Видно, что при изменении конфигурации температура через 1 ч после начала нагрева равна 32 °C в исходной системе и 33,6 °C — при использовании теплопроводной пасты. Поскольку начальная температура во всех случаях одинакова и равна 23 °C, приращения температуры равны 9 и 10,6 °C соответственно.

Число Фурье в точке замера температуры в конце периода нагрева $Fo = at/h^2 = 1,35$, т. е. стационарный режим еще не достигнут. Дальнейший нагрев, очевидно, еще более увеличил бы разность между приращениями температуры, однако он был прекращен из-за возможного изменения свойств материала. Считая эти приращения стационарными и учитывая, что тепловой поток через один и тот же слой одного и того же материала пропорционален разности температуры на нем, находим, что тепловой поток в результате применения теплопроводящей пасты возрос в 10,6/9,0 раз, т. е. на 18 %. Эксперимент с прямым контактом продукта с греющей поверхностью (без дна) свидетельствует о том, что этот результат является практически неулучшаемым. Подобные эксперименты были проведены и в вакууме.

Итак, эксперименты показали, что заполнение теплопроводящей пастой зазоров между дном флякона и греющей поверхностью увеличивает тепловой поток в продукт на 18 %.

Математическая модель процесса

Математическая модель процесса сублимационной сушки замороженного биологического материала позволяет не только получить количественные характеристики рассматриваемого процесса, но и провести сравнительный анализ процессов при различных внешних воздействиях. В данном случае будет проведен сравнительный анализ, показывающий влияние теплового потока на скорость протекания процесса сублимации.

Сублимируемый материал может либо представлять собой слой, находящийся на греющем поддоне, либо быть заключен в какие-либо емкости (фляконы, ампулы и т. п.), расположенные на поддоне. Процесс происходит, как правило, в вакууме. При этом имеют место определенные физические явления, основными из которых являются перенос тепла и массы. На границе между замороженным материалом и паром, благодаря пониженному давлению и подводу тепла, создаются условия, при которых лед испаряется, минуя жидкую fazу. Этот процесс и называется сублимацией.

Расчеты рассматриваемых процессов основаны на системе уравнений тепло- и массообмена с учетом фазовых превращений. Математическая модель включает следующие условия.

1. Уравнение теплопроводности (в твердой и газообразной фазах):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T),$$

где T — температура, °C;

C_p — теплоемкость, Дж/(кг·К);

k — теплопроводность, Вт/(м·К);

t — время, с.

2. Уравнение диффузии, т. е. переноса пара в свободном пространстве:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla(D \nabla c),$$

где c — концентрация пара, моль/м³;

D — коэффициент диффузии, м²/с.

3. Условия на подвижной границе фазового перехода. При термодинамическом равновесии на границе фазового перехода концентрация пара над поверхностью льда

$$c = \frac{P_v}{RT},$$

где P_v — парциальное давление пара, Па;

$R = 8,314$ Дж/(моль·К) — газовая постоянная;

T — температура, К.

Зависимость парциального давления от температуры имеет вид

$$\ln P_v = 9,55 - 5723T^{-1} + 3,53 \lg T - 0,00728T.$$

Эти и дальнейшие числовые значения относятся к водянистому пару и льду.

Скорость движения границы фазового перехода V , м/с, вычисляем, исходя из теплового баланса на границе, с учетом возможного нагрева ее излучением:

$$V = \frac{Q + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)}{\rho_{ice} L},$$

где Q — рассчитываемый скачок теплового потока на границе, Дж/(м²·с);

ε — степень черноты;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана;

T_{amb} — температура внешней среды, К;

$L = 2,84$ МДж/кг — скрытая теплота сублимации льда.

Данная скорость определяет поток N_v , моль/(м²·с), сублимационного пара, отходящего от подвижной границы, в виде

$$-\vec{n} N_v = \frac{\rho_v - \rho_{ice}}{M_v} V,$$

где $M_v = 0,018$ кг/моль — молекулярный вес пара.

Этот поток является граничным условием для уравнения диффузии пара.

Развитие математической модели

В данной постановке в модели отсутствует сухой каркас сублимированного материала. Однако при обработке биоматериалов он всегда имеется. Гидравлическое сопротивление каркаса (если он сохраняется) или сопротивление осыпавшегося слоя (если каркас разрушается и осыпается) оказывают влияние на коэффициент диффузии, величину давления на границе фазового перехода, скорость движения границы. Мы предлагаем развитие данной модели, позволяющее учесть наличие такого каркаса, причем только математическими средствами, без задания его геометрического образа, хотя бы в виде тонкого начального слоя. В этом методе коэффициент диффузии каркаса и пара задается единым выражением вида

$$\frac{D - D_k}{D_v - D_k} = \chi(z, z_0),$$

где D_k — коэффициент диффузии каркаса, $\text{м}^2/\text{с}$;
 D_v — коэффициент диффузии пара, $\text{м}^2/\text{с}$;
 z_0 — начальная толщина (координата) сублимирующегося слоя, м.

В случае осыпания координата z_0 может зависеть от времени, т. е. $z_0 = z_0(t)$.

Характеристическая функция χ , равная нулю при $z < z_0$ (в пределах каркаса) и единице при $z > z_0$ (выше каркаса), может быть задана различным образом, например так:

$$\chi(z, z_0) = \text{flc2hs}((z - z_0), dz).$$

Данное выражение представляет собой единичную ступенчатую (при $z = z_0$) функцию, скачок которой сглажен на интервале dz . Необходимость сглаженности вызывается алгоритмом расчета.

Другим примером сглаженной функции Хевисайда может служить выражение

$$\chi(z, z_0) = 2^{-e^{-a(z/z_0 - 1)}},$$

где величина a определяет интервал сглаживания.

Теплопроводность и плотность каркаса задаются аналогичным образом.

Сравнительные расчеты на основе разработанной математической модели

Сравнивались между собой результаты расчетов, а именно скорости движения границы, при двух тепловых потоках, отличавшихся друг от друга на ту же величину, которая была достигнута в экспериментах, — на 18 %. При этом абсолютные величины этих тепловых потоков особого значения не имеют. При невысоком

исходном слое замороженного материала (8 мм) и, соответственно, быстром достижении квазистационарного режима для получения скорости движения границы было вполне допустимо остановиться на четырехчасовом времени процесса сублимации.

Рассмотрен процесс в ампуле со следующими геометрическими характеристиками: общая высота — 22 мм, диаметр — 10 мм, начальная высота слоя материала в ампуле — 8 мм.

Для реализации математической модели использовался программный комплекс «Comsol Multiphysics». Расчет являлся нестационарным. Были заданы следующие граничные условия. На нижней границе (при $z = 0$): тепловой поток $q = 2,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в первом случае и $q = 2,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ во втором, т. е. тепловые потоки в двух этих случаях отличались на 18 %; на верхней границе (при $z = 0,022 \text{ м}$) — $T = 230 \text{ К}$. Давление пара принималось равным 40 Па. На боковых поверхностях цилиндра задавались граничные условия третьего рода с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что соответствует свободной конвекции. Коэффициент диффузии пара в свободном пространстве принимался равным $0,05 \text{ м}^2/\text{с}$; в каркасе — $0,02 \text{ м}^2/\text{с}$.

Начальные условия брались из результатов предварительного стационарного расчета системы в ее начальном состоянии, т. е. без сублимации. Начальные условия для температуры составляли: для льда — от 239 (при $z = 0$) до 236,5 К (при $z = z_0 = 0,008 \text{ м}$); для пара — от 236,5 (при $z = z_0 = 0,008 \text{ м}$) до 230 К (при $z = 0,022 \text{ м}$). Начальные условия для концентрации составляют от 0,0096 (при $z = z_0 = 0,008 \text{ м}$) до 0,005 моль/ м^3 (при $z = 0,022 \text{ м}$).

Алгоритм расчета основан на методе конечных элементов, представляющем в данном случае полуслабую вариационную формулировку исходной задачи [8], и методе Галеркина. В связи с наличием в процессе движущейся границы фазового перехода применялась подвижная расчетная сетка. Результаты этих расчетов показаны на рис. 6, 7.

На рис. 6 показано распределение температуры системы по высоте в начале (верхняя кривая) и в конце расчетного периода.

На рис. 7 отображен ход движения границы при двух тепловых потоках ($2,2$ и $2,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Соотношение этих тепловых потоков соответствует соотношению тепловых потоков от греющей поверхности к фланку в проведенных экспериментах при наличии зазора и при его отсутствии (заполнение теплопроводящей пастой).

Видно, что при тепловом потоке $Q = 2,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ толщина сублимирующегося слоя за заданное время (4 ч) составила 4,2 мм, а средняя скорость движения границы — 1,05 мм/ч. При тепловом потоке $Q = 2,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$, т. е. на 18 % большем, толщина сублимирующегося слоя за это же время составила 5,1 мм, а средняя скорость движения границы — 1,275 мм/ч, или на 21 % больше.

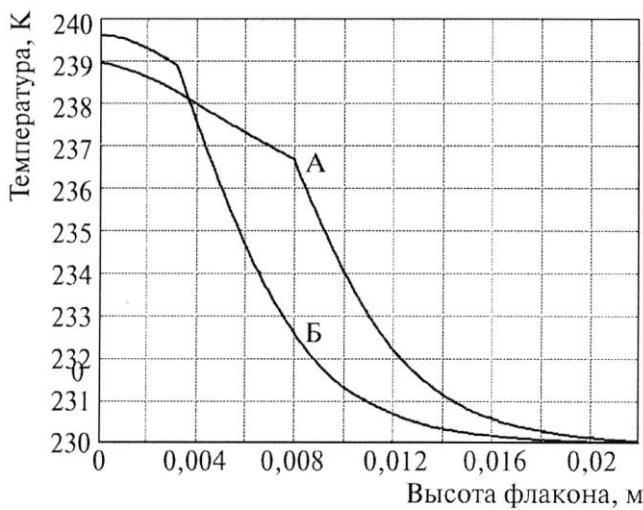


Рис. 6. Температура на фронте сублимации в начале процесса (кривая А) и в конце расчетного периода (кривая Б)

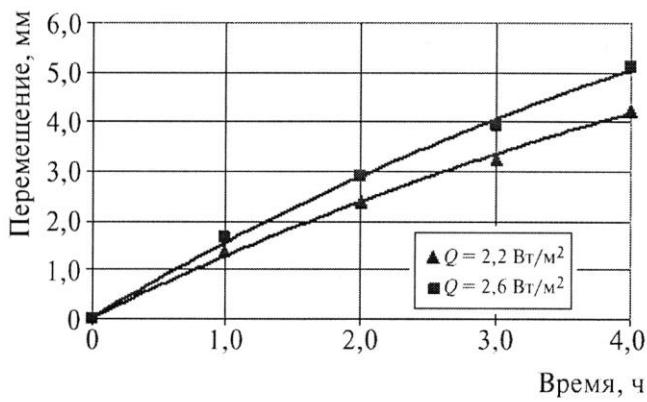


Рис. 7. Зависимость перемещения границы от времени при тепловых потоках $Q = 2,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (нижняя кривая) и $Q = 2,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (верхняя кривая)

Таким образом, применение теплопроводящей пасты между нагревательной поверхностью и дном ампулы дает существенный результат.

Выводы

1. В работе представлены результаты по сложной проблеме моделирования теплофизических и массообменных процессов при наличии фазовых переходов. Экспериментально и теоретически рассмотрен вопрос о влиянии зазора между плоским нагревателем и дном теплоприемника (флакона или ампулы) на тепловой поток

к теплоприемнику и на скорость движения границы фазового перехода (сублимации) в теплоприемнике.

2. Представлена математическая модель процесса сублимации и приведен метод ее реализации. В развитие этой модели предложена методика учета свойств осущест-вленного каркаса без выделения его как отдельного, заранее сформированного слоя.

3. Проведенное исследование выявило большое влияние зоны контакта между нагревателем и объектом тепловой обработки на продолжительность этой обработки. Показано, что заполнение зазора между дном теплоприемника и нагревателем теплопроводящим составом (пастой) приводит к 18 %-му росту теплового потока и к 21 %-му росту скорости сублимации. Оказалось, что получаемый (тем или иным способом) выигрыш в величине воспринимаемого теплового потока не только не нивелируется, не уменьшается при рассмотрении процесса в целом, но сохраняется и даже увеличивается.

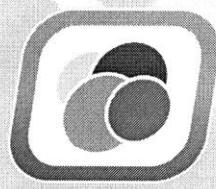
4. Показано, что разработанная на основе программного комплекса «Comsol Multiphysics» и развитая в работе математическая модель позволяет проводить расчеты технологических процессов замораживания, сублимационной сушки и других аналогичных процессов, учитывая при этом практически все действующие факторы, их переменные свойства, взаимовлияние во времени и в пространстве. Это позволит проводить многовариантные расчеты, направленные на минимизацию энергозатрат, на выбор оптимальных режимов обработки при получении и сохранении заданного уровня качества продукта. Предложенная расчетная методика позволяет дать реальную оценку длительности процесса вакуумной сублимационной сушки с учетом условий контактирования.

5. Результаты работы показывают, что использование стеклянных емкостей с более качественной и ровной поверхностью либо выполнение операции «притирки» дна ампулы (флакона) к теплоподводящей поверхности являются мерами, значительно уменьшающими тепловое сопротивление контакта. Как показали эксперименты, эти простые меры приводят к существенным улучшениям условий теплопередачи. Кроме того, перспективным представляется использование в промышленном производстве каких-либо разрешенных к применению теплопроводящих пастообразных материалов, наносимых тонким слоем на поверхность плит.

Список литературы

1. Гайго Э. И., Журавская Н. К., Каухчевили Э. И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности. — М.: Пищ. пром-ть, 1972.

2. Камовников Б. П., Малков Л. С., Воскобойников В. А. Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов. — М.: Агропромиздат, 1985.
3. Семенов Г. В., Орешина М. Н. Процесс вакуумной сублимационной сушки термолабильных материалов // Теоретические основы пищевых технологий. Т. 2. — М.: КолосС, 2009.
4. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. — М.: Энергия, 1977.
5. Меснянкин С. Ю., Викулов А. Г., Викулов Д. Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 9.
6. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974.
7. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976.
8. Деклу Ж. Метод конечных элементов. — М.: Мир, 1976.



Организатор:
Мир-Экспо
МОСКОВСКАЯ КОМПАНИЯ

Девятая международная специализированная выставка **Криоген-Экспо**

9-11 ноября 2010, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР», пав. 5

Проводится при содействии:

- Международного института холода
- Международной академии холода
- Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»

ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ:

- Криогенное оборудование
- Гелиевое оборудование
- Вакуумное оборудование
- Холодильное и компрессорное оборудование
- Микрокриогенная техника
- Сжиженный природный газ
- Промышленные и редкие газы
- Применение криогенных технологий в промышленности
- Системы безопасности
- Водородные технологии
- Применение криогенных технологий в медицине и биологии, научно-технических исследованиях
- Емкости для хранения и транспортировки
- Метрология и средства измерения при низких температурах
- Комплектующие, вспомогательное оборудование, системы управления и программное обеспечение
- Сертификация и технические регламенты в криогенной отрасли
- Система образования и кадровое обеспечение

Информационная поддержка:



В рамках выставки проводятся
СПЕЦИАЛЬНЫЕ САЛОНЫ:

- ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГАЗЫ
- ГЕЛИЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

- 7-я международная научно-практическая конференция: «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития»
2-ой семинар: «Опыт учебной работы Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана по подготовке инженеров в области криологии»

КРИОГЕН-ЭКСПО НА РУССКОМ:
www.cryogen-expo.ru
CRYOGEN-EXPO IN ENGLISH:
www.cryogen-expo.com



Дирекция 115533, Москва, пр. Андропова, 22
выставки: Тел./факс: 8 499 618-05-65, 8 499 618-36-88
E-mail: info@cryogen-expo.ru | Сайт: www.cryogen-expo.ru