

Авторефер.

Р 64

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

На правах рукописи

РОЗМАН Евгений Викторович

Принято 19.07/78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
И ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ С ЦЕЛЬЮ  
ЕГО АВТОМАТИЗАЦИИ

Специальность 05.13.07 - автоматическое  
управление и регулирование, управление  
технологическими процессами  
(пищевая промышленность)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса 1978

Работы в  
торском и  
защиты пи

Научн

Офици  
профессор  
доцент, к

Ведущ

Молда  
вой промыш

тно-конструк-  
те автоматиза-  
томатика".

техничес-  
в П.Н.

в Р.А.;  
А.И.

ститут нише-

Защита состоится "30" июня 1978 г. в  
14<sup>40</sup> час. на заседании специализированного совета -  
шифр КО 68.35.01 Одесского технологического института  
пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова по адресу:  
270039, г. Одесса, ул. Свердлова, 112.

в библиотеке

1978 г.

Миронов И.С.

ОНАХТ 29.05.12

Исследование процесс



v013169

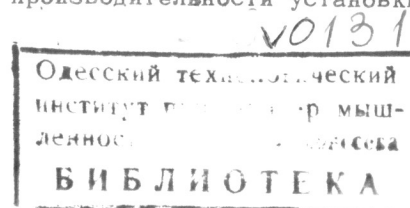
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Определенные XXV съездом КПСС основные направления развития народного хозяйства СССР предусматривают по пищевой промышленности "значительно повысить качество, биологическую ценность и вкусовые достоинства продуктов питания... Высокими темпами развивать производство разнообразных высококачественных продуктов... консервированных блюд с повышенной степенью готовности..."

К числу методов, обеспечивающих высококачественное консервирование продуктов питания и имеющих широкую перспективу промышленного использования, принадлежит сублимационная сушка.

Особенность сублимационной сушки - наличие зон материала с отрицательной и положительной температурой, взаимодействие которых в разреженной среде сублимационной камеры с носителями энергии различного потенциала (элементами нагревателей и десублиматора) осуществляется при жестких технологических регламентах на значения координат процесса, причем последние характеризуются ограниченной измеримостью.

Соблюдение регламентов и обеспечение требуемых качественных показателей готового продукта достижимо в принципе за счет использования "мягких" режимов, т.е. уменьшения разности температур между нагревателями и поверхностью материала и, как следствие, снижения производительности установки.



Такой подход неприемлем при промышленном производстве, когда одной из важнейших является задача достижения экономически целесообразной производительности.

Решение этой задачи при создании в настоящее время головных образцов отечественных промышленных установок выдвинуло на первый план как особо значимые и актуальные проблемы обеспечения управляемости процесса и оптимизации технологических режимов.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

- получено комплексное математическое описание установок сублимационной сушки как объекта управления, включающее аналитические решения уравнений теплообмена на этапе собственно сублимации в виде безразмерных комплексов, позволяющих учесть влияние нестационарности температурного поля подсыхающего слоя материала и эффект его охлаждения эвакуируемым паром;

- предложена математическая модель этапа досушивания;

- выбраны и обоснованы критерии управления теплоподводом и эффективности работы конденсатора-вымораживателя;

- разработаны методы измерения парциального давления водяных паров в сублимационной камере и определения момента окончания процесса.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

- созданы системы автоматизации головных образцов промышленных автоматизированных сублимационных установок периодического действия;

- разработаны оптимальные программы теплоподвода для исследуемых материалов и АСУ (автоматическая система управления) для реализации этих программ;

- показана возможность соблюдения заданных программой параметров теплоносителя (в установках с

жидким высокотемпературным теплоносителем) без использования контура охлаждения;

- разработаны устройства для измерения величины парциального давления водяных паров в установках сублимационной сушки; для определения момента окончания процесса в установках периодической сублимационной сушки; для определения эффективности работы конденсатора-вымораживателя и момента времени обновления поверхности десублимации.

Цель диссертационной работы. Исследование процесса и оборудования сублимационной сушки пищевых продуктов, определение оптимальных режимов проведения процессов, построение алгоритмов управления и синтез АСУ.

Конкретная прикладная роль указанной проблемы выдвинула на первый план наряду с задачей уточнения теоретических представлений о закономерностях процесса задачу его идентификации и обеспечения измеримости координат, необходимых для целей управления, что и определило структуру диссертационной работы: теоретические и экспериментальные исследования, завершающиеся синтезом оптимальной системы управления; исследование и разработка средств, позволяющих реализовать полученные решения.

Объем диссертации: 112 стр. основного текста, 42 рис., 9 табл. и 21 стр. приложений.

В приложения вынесены материалы промышленного внедрения результатов исследования и аналитическое решение уравнения модели процесса досушивания.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Объект и задачи управления.

Процесс сублимационной сушки осуществляется периодически и отличается существенной нестационарностью, связанной с изменением полей температуры и влажности материала, перемещением фронта сублимации и ростом ледяной шубы десублиматора. Длительность цикла сушки меняется в широких пределах и зависит от свойств материала и условий энергоподвода.

В обобщенной схеме исследуемого процесса условно выделены (рис. 1) высушиваемый материал 1, воспринимающий тепловой поток  $q_n$ ; излучатели 2; десублиматор 3, на котором вымораживается паровой поток  $g_n$ ; источники тепловой энергии 4; источники холода 5; управляющее устройство УУ.

Задача состоит в построении оптимального в смысле некоторого критерия алгоритма управления с учетом действующих ограничений:

$$t_n \leq t_{n\text{зад}}; P_z \leq P_{z\text{зад}}; U_c \leq U_{c\text{зад}}.$$

где  $t_n$  — температура поверхности материала;

$P_z$  — парциальное давление в зоне сублимации;

$U_c$  — конечная влажность материала;

$t_{n\text{зад}}, P_{z\text{зад}}, U_{c\text{зад}}$  — их максимально допустимые значения.

Показано, что в качестве целевой функции целесообразно принять достижение минимальной длительности

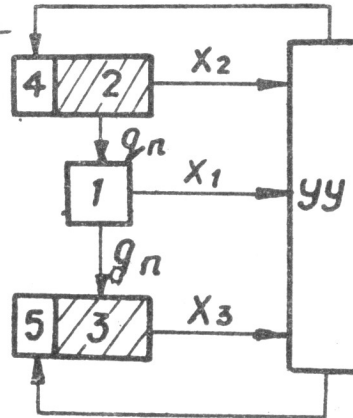


Рис. 1

цикла сублимационной сушки.

Детализация модели в соответствии с обобщенной схемой исследуемого процесса выполнена с учетом конструктивных особенностей исследуемого оборудования,

Процессы десублимации и теплообмена в высушиваемом материале описаны идентичными моделями для установок со светлыми излучателями с жидким теплоносителем.

Процесс сублимационной сушки материала рассматривается как двухстадийный — собственно сублимация и досушивание.

Этап собственно сублимации. Математическая модель процесса сублимации при внешнем теплоподводе со стороны подсыхающего слоя продукта записана в виде:

$$a_c \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $\theta = t - t_z$ ,  $t$  — температура перед фронтом сублимации материала;

$t_z$  — температура фронта сублимации;

$x$  — координата слоя;  $b = \frac{g_n c_n}{\rho_c c_c}$ ;

$c_c$  — теплоемкость сухого материала;

$\rho_c$  — плотность сухого материала;

$a_c$  — его температуропроводность;

$g_n$  — количество выделившегося пара;

$c_n$  — его теплоемкость.

Граничные условия:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{x=0} = -\frac{q_n}{\lambda_c}; \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{x=z} = \frac{r \rho_0 \Delta U_0}{\lambda_c} \frac{dz}{d\tau}; \quad (3)$$

$$(\theta)_{x=z} = t_z - t_z = 0; \quad (4)$$

$$(\theta)_{x=0} = t_n - t_z. \quad (5)$$

Начальное условие  $(\theta)_{\tau=0} = 0$ .

Здесь  $q_n$  — тепловой поток, проходящий через поверхность материала,  $r$  — теплота сублимации льда,  $\rho_0$  — плотность исходного материала,  $\Delta U_0$  — изменение влажности на фронте сублимации,  $z$  — координата фронта сублимации,  $\lambda_c$  — теплопроводность подсыхающего материала.

В силу прикладного характера работы особое внимание уделено анализу модели в направлении оценки возможного ее упрощения без существенного ущерба адекватности реальному процессу.

Главным образом оценивалась значимость учета нестационарности температурного поля и теплообмена паров с подсыхающим материалом путем сравнения результатов, получаемых по каждому из двух вариантов упрощения модели при  $b \neq 0, \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$  (6) и при  $b = 0, \frac{\partial \theta}{\partial x} \neq 0$  (7) между собой и с решением уравнения стационарной теплопроводности через подсыхающий слой продукта с подвижной границей  $\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0$ . (8)

Решения уравнений (1), (6), (7), (8) справедливы в области  $0 \leq x \leq z$  при одинаковых граничных и начальном условиях.

Общее решение уравнения (8):

$$\theta(x, \tau) = \theta_n \left[ 1 - \frac{x}{x_z(\tau)} \right]; \quad (9)$$

$$q_n = \frac{1}{r} q_n; \quad (10)$$

$$x_z^2(\tau) = \frac{2\lambda_c}{r\rho_0\Delta U_0} \int_0^\tau \theta_n(\tau) d\tau, \quad \text{или} \quad (11)$$

$$x_z(\tau) = \frac{1}{r\rho_0\Delta U_0} \int_0^\tau q_n(\tau) d\tau; \quad (12)$$

$$\theta_n(\tau) = \frac{1}{\lambda_c} x_z(\tau) q_n(\tau). \quad (13)$$

Решения

$$x_z(\tau) = B\sqrt{\tau} S; \quad (14)$$

$$q_n(\tau) = \frac{\lambda_c \theta_n}{B\sqrt{\tau}} R \quad (15)$$

уравнений (1), (6), (7) для частного случая  $t_n = t_n \text{ зад}$  (или  $\theta_{x=0} = \theta_{\max} = \text{const}$ ), который соответствует постоянной и максимально допустимой температуре поверхности материала, представлены в виде сходящихся рядов, первым членом которых является решение уравнения (8).

В (14), (15):  $B = \sqrt{\frac{2\lambda_c \theta_n}{r\rho_0 \Delta U_0}}$  — постоянный для всех случаев коэффициент скорости сушки,  $R$  и  $S$  — безразмерные поправочные коэффициенты, зависящие от принятых допущений, теплофизических свойств материала и температуры его поверхности. В (9)+(13)

$$R = S = 1.$$

Значения коэффициентов  $R$  и  $S$  в решениях уравнений (1), (6) и (7) различны и зависят от трех

безразмерных параметров

$$\frac{B^2}{a_c}; f = \frac{\rho_0 \Delta U_0 a_c c_n}{\lambda c}; \frac{c_n \theta_m}{r}. \quad (16)$$

Коэффициенты  $R_2$ ,  $S_2$ , определяющие отклонения решений (7), зависят только от параметра  $\frac{B^2}{a_c}$ , учитывающего нестационарность процесса, а коэффициенты  $R_3$  и  $S_3$ , определяющие отклонение решений (7), — от  $\frac{c_n \theta_m}{r}$ , характеризующего долю тепла, отведенного за счет теплообмена с паром в стационарном процессе. Значения поправочных коэффициентов  $R_1, R_3$  и  $S_1, S_3$  вычислены с помощью ЭВМ в функции безразмерных параметров  $\frac{B^2}{a_c}$ ,  $\frac{c_n \theta_m}{r}$  и  $f$ .

Анализ полученных результатов показал, что в исследуемой области значений параметров введение в уравнение (8) дополнительных членов практически не изменяет численный результат решения.

Для исследуемых материалов животного происхождения — мяса говяжьего и растительного происхождения — картофеля в ломтиках и вишневого пюре получены следующие результаты: учет нестационарности процесса приводит к уменьшению ошибки в вычислении скорости сушки на 0,5–0,7%, а учет теплообмена паров с материалом — на 1–2%; при этом расчетные значения теплового потока возрастают на 3–5%. Близкие результаты характерны для большинства пищевых продуктов.

Столь малые отклонения объясняются тем, что нестационарность процесса в основном определяется скоростью движения фронта сублимации, которая задается условием на границе (3) и лимитируется термическим сопротивлением подсыхающего слоя материала.

Эффект охлаждения этого слоя паром незначителен, так как количество тепла, отданное пару, несущественно по сравнению с теплотой сублимации.

В установках с радиационным теплоподводом имеет

место постепенный прогрев поверхности до температуры  $t_{nзад}$  постоянным тепловым потоком  $q_n = q_{nm}$  в течение промежутка времени  $\tau_m$ , после чего начинает действовать граничное условие  $\theta_n \leq \theta_{nзад} (t_n \leq t_{nзад})$ .

Для этого случая на этапе собственно сублимации рассмотрены две стадии энергоподвода:

а) период постоянного и максимального энергоподвода:

$$\tau \leq \tau_m; q_n = q_m = const. \quad (17)$$

Решение уравнения (8) позволяет получить

$$\tau_m = r \rho_0 \Delta U_0 \lambda c \frac{\theta_{nзад}}{q_m^2}; \quad (18)$$

$$q_m = \frac{q_n}{r}; \quad (19)$$

б) период падающего энергоподвода при постоянной и максимальной температуре поверхности материала:

$$\tau > \tau_m; \theta_n = \theta_{nзад} = const.$$

В этом периоде координата фронта сублимации изменяется в соответствии с уравнением:

$$X_z(\tau) = B \sqrt{\tau - \frac{1}{2} \tau_m}, \quad (20)$$

а величина теплового потока, воспринятого материалом, которая определяет максимальную интенсивность процесса при постоянной температуре фронта сублимации  $t_x$ , описывается зависимостью:

$$q_n(\tau) = q_m \sqrt{\frac{\tau_m}{2\tau - \tau_m}}. \quad (21)$$

Зависимости, полученные при решении уравнения (8) с граничными условиями (2), (3), (4), (5), использованы в работе в качестве математической модели материала на

этапе собственно сублимации.

Математическая модель температурного поля материала при досушивании. Этап досушивания связан с удалением части  $\Delta U_g$  влаги, оставшейся в материале после собственно сублимации ( $\tau = \tau_g$ ), и характеризуется отличными от последней закономерностями, представленными в виде функциональной связи между температурой центра и поверхности материала. Показано, что для этапа досушивания

$$\Pi(\tau - \tau_g) \frac{dt_z(\tau - \tau_g)}{d\tau} + t_z(\tau - \tau_g) = t_n(\tau - \tau_g). \quad (22)$$

Коэффициент при производной  $\Pi(\tau - \tau_g)$  зависит от среднего влагосодержания материала

$$\Pi(\tau - \tau_g) = \Pi_1 U_{cp}(\tau - \tau_g), \quad (23)$$

где  $\Pi_1$  - постоянный коэффициент.

В предположении справедливости на этапе досушивания приведенного А.В. Лыковым уравнения для сушки капиллярно-пористых тел

$$U_{cp}(\tau - \tau_g) = (U_g - U_c) \exp[-K_c(\tau - \tau_g)] + U_c \quad (24)$$

после интегрирования уравнения (22) и определения произвольных постоянных получаем:

$$t_z = t_n (t_n - t_{z0}) \exp\left\{-\frac{\tau - \tau_g}{\Pi_1 U_c} - \frac{1}{\Pi_1 U_c K_c} \ln\left[\frac{U_c + U_g - U_c}{U_g} \exp(-K_c \tau + K_c \tau_g)\right]\right\} \quad (25)$$

где  $K_c$  - коэффициент сушки;

$U_g$  - средняя влажность материала в начале досушивания.

Математическая модель контура десублимации. При конденсации пара на поверхности десублимации теплоты фазового превращения переносятся только теплопровод-

ностью через слой льда.

Показано, что математической моделью контура вымораживания является уравнение теплопроводности через плоскую стенку с учетом ее тепловой инерции и переменной толщины:

$$t_n = t_K + \frac{2F_n \Gamma_n}{F_K \lambda_n} g_n \delta_n - \frac{1}{2} \frac{\rho_n c_n}{\lambda_n} \delta_n \frac{dt_n}{d\tau}, \quad (26)$$

где  $t_K$  - температура конденсации;  
 $g_n$  - количество пара, выделяющегося из продукта;  
 $\delta_n, \lambda_n, \rho_n, c_n, \Gamma_n$  - соответственно, толщина, теплопроводность, плотность, теплоемкость льда и теплота парообразования;  
 $F_n$  и  $F_K$  - поверхности продукта и секции конденсатора, работающей в момент расчета.

Толщина ледяной шубы  $\delta_n$  определяется суммарным количеством влаги, вымороженной на конденсаторе:

$$\delta_n = \frac{2F_n}{F_K \rho_n} \int_{t_i}^{t_n} g_n d\tau. \quad (27)$$

Парциальное давление в камере  $P_K$  определяется температурой на поверхности ледяной шубы с учетом падения давления по пути парового потока.

Идентификация математической модели теплообмена в материале. Для целей экспериментальных исследований соотношения (4) и (13) преобразованы к виду:

$$t_x - t_z = \frac{r g_n(\tau)}{\lambda_c} \left[ \int_0^{\tau} \frac{g_n(\tau) d\tau}{\rho_c (U_0 - U_c)} - X \right] \quad (28)$$

( $t_x$  — температура материала на глубине  $x$ ), при котором из рассмотрения исключена величина температуры поверхности материала, а параметры, определяемые при эксперименте, измеримы.

Для интервала от  $\tau_{i-1}$  до  $\tau_i$ :

$$t_{i-1} - t_i = \frac{r g_n(\tau_i)}{\lambda_{ci}} \left[ \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{g_n(\tau) d\tau}{\rho c (U_0 - U_c)} - X_i \right]. \quad (29)$$

Шаг термомар при эксперименте принят равным 2 мм, интервал между измерениями  $\tau_i - \tau_{i-1} = 3$  мин. Момент окончания сублимации в слое толщиной  $X_i$  фиксируется при достижении нулевого показания  $i$ -й термомарой.

Идентификация проведена по коэффициенту  $\lambda_c$  методом аппроксимации нестационарного объекта моделью с кусочно-постоянными параметрами. Значения  $\lambda_c$ , рассчитанные для каждого из выбранных интервалов, использованы при моделировании.

Отклонение значений параметров, рассчитанных из модели, от экспериментальных значений, составляют: по температуре  $t_x$  в области положительных значений — 4% для мяса говяжьего и картофеля и 5% для вишневого пюре; по координате фронта сублимации — 3–5% для говяжьего мяса, 4–5% для картофеля и 6–8% для вишневого пюре.

Зависимость параметра  $\lambda_c$  от координаты фронта сублимации аппроксимирована линейной функцией

$$\lambda_c(X_z) = \lambda_{c0} + K_p(X_0 - X_z), \quad (30)$$

где  $\lambda_{c0}$  — теплопроводность слоя при окончании периода собственно сублимации;

$K_p$  — коэффициент пропорциональности.

На этапе досушивания идентификация модели (22), (23) сводится к расчету коэффициента  $\Pi_1$ . Значения ос-

таточной средней влажности  $U_c$  определены взвешиванием образца, величина  $\tau_g$  — визуально.

Максимальное отклонение темпа роста температуры центра материала  $t_x$  на этапе досушивания для исследуемых материалов не превысило 3% от расчетных значений.

Отклонение продолжительности цикла  $\tau_0$  составляет 7% от расчетных значений, причем для большинства опытов реальный процесс заканчивался быстрее.

Модели звеньев энергоподвода для установок со светлыми излучателями учитывают практическую безынерционность теплопроводящих звеньев и существенное различие в степени нагрева теплоизлучающих элементов.

Для установок с жидким теплоносителем обоснована правомерность представления звеньями с сосредоточенными параметрами таких основных элементов схемы подготовки теплоносителя, как камеры смешения горячего и холодного контура, излучающих плит сублиматора, calorных баков, холодильников и аккумуляторов холодного контура.

При этом показано, что транспортным запаздыванием в рассматриваемой схеме можно пренебречь.

С использованием комплексной математической модели получены: формальные описания критериев управления энергоподводом и десублиматором, косвенные параметры определения момента завершения процесса, оптимальные программы энергоподвода и структура АСУ, реализующей эти программы.

Критерии управления. Управление процессом, при котором минимизируется значение функционала

$$J = 1 - \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{t_n(\tau) - t_z(\tau)}{|t_n(\tau) - t_z(\tau)|_{\max}} d\tau, \quad (31)$$

обеспечивает выполнение условий оптимальности в смысле завершения цикла сушки за минимальное время.

Траектория движения процесса определяется количеством тепла, воспринятого материалом:

$$q_n(\tau) = \frac{\lambda_c}{x_z(\tau)} [t_n(\tau) - t_z(\tau)]. \quad (32)$$

Температура центра материала  $t_z(\tau)$  в выражении (32) для периода собственно сублимации функциональна и связана с температурой поверхности десублимации, уровень поддержания которой диктуется неравенством  $t_z \leq t_z^{зад}$ . Приведенное неравенство справедливо в течение всего периода собственно сублимации.

Максимальная величина теплового потока, воспринятого материалом, соответствует максимальной разности  $|t_n(\tau) - t_z(\tau)|$ .

Соотношение:

$$\frac{q_n(\tau)}{q_{n\max}} = \frac{t_n(\tau) - t_z(\tau)}{|t_n(\tau) - t_z(\tau)|_{\max}} \quad (33)$$

в каждый момент цикла характеризует фактическое отклонение интенсивности сушки от максимально возможной.

Таким образом, синтез системы по критерию минимизации интегральной оценки (31) имеет четкий физический смысл: максимизация количества тепла, воспринятого материалом в течение цикла сушки, при ограничениях по максимально допустимым температурам поверхности и центра материала.

Для материалов с низким значением коэффициента паропроницаемости фактором, лимитирующим интенсивность процесса, является сопротивление подсыхающего слоя.

Перепад давления в этом слое приводит к росту парциального давления в зоне сублимации  $P_z$  и, следовательно, температуры замороженной зоны  $t_z$ . Величина  $t_z(\tau)$  в числителе (31) достигает предельно допус-

тимых значений  $t_z^{зад}$  раньше, чем температура поверхности значения  $t_n^{зад}$ .

Показано, что смысл критерия (34) сохраняется и на этапе досушивания.

С учетом сказанного оптимальная траектория обеспечивается соответствующим выбором программ энергоподвода к материалу и их реализацией при условии изменения температуры  $t_n$  путем периодического обновления поверхности десублиматора.

Такое управление уровнем температуры  $t_n$  эквивалентно ступенчатому воздействию, приложенному в момент времени  $\tau_i$ .

Значение  $\tau_i$  определяется при достижении критерием эффективности работы конденсатора-вымораживателя  $\beta' = t_n - t_k$  (либо  $\beta = t_n - t_{cr}$ ) величины  $\beta^{зад}$ . Ее вычисление для конкретной установки и материала проводится минимизацией функционала:

$$\beta^{зад} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} [t_n(t_k, q_n, \delta_n) - t_{cr}] d\tau}{\tau_0} \right|_{\min} \quad (34)$$

Обоснованность выбора критерия  $\beta$  подтверждается анализом сил массопереноса, величина которых пропорциональна разности парциальных давлений водяного пара на поверхности сублимации и десублимации.

Так как при одной и той же температуре стенки десублиматора величина парциального давления у поверхности десублимации увеличивается с увеличением перепада температуры на ледяной шубе, последний характеризует эффективность работы десублиматора.

Минимизация величины  $\beta^{зад}$  за цикл сушки обеспечивает максимальную интенсивность процесса при заданной программе энергоподвода.

№. 0. 13169

Оптимальные программы теплоподвода, синтез АСУ, результаты исследования модели, методы и средства для реализации полученных решений.

Программы энергоподвода в виде функций  $q_n(t)$  получены на АВМ решением математической модели объекта, дополненной условиями оптимальности  $t_{n300} - t = 0$ , либо  $t_{z300} - t_z = 0$ , выбираемыми автоматически в зависимости от величины подинтегральной функции в выражении (31).

При заданных функциях  $q_n(t)$  определены численные значения  $\beta_{300}$  в соответствии с уравнением (34) и вычислен предельный минимум оценки (31).

Принципиальная особенность АСУ для установок сублимационной сушки — программное управление теплоподводом на этапе собственно сублимации с последующим замыканием системы на этапе досушивания по температуре поверхности материала. Оптимальные законы регулирующих воздействий для указанной структуры и непрерывных общепромышленных регуляторов определены с учетом оценок (31) и (34).

Анализ действующих возмущений позволил сделать вывод, что наиболее существенным является изменение коэффициентов  $U_0, \lambda_c, \chi_0$ , характеризующих свойства материала. Из внешних возмущений наиболее сильное влияние на координаты процесса оказывает изменение температуры конденсации, причем значимость возмущения находится в зависимости от момента времени его приложения. Оценены допустимые значения этого возмущения на всех стадиях процесса. Показано, что пиковые изменения величины температуры конденсации на начальных стадиях сушки приводят к выходу значений параметров, характеризующих качество материала, за пределы технологических регламентов.

Показано, что для установок с жидким теплоносителем контур охлаждения излишен в течение всего цикла

сушки. Упразднение холодного контура значительно сокращает капитальные затраты на установки подобного типа.

Установлено, что при приближении к оптимальной траектории из-за возмущений, вносимых разбросом свойств материала, возникает дефицит информации, не позволяющий с достаточной точностью зафиксировать момент завершения процесса, и найден косвенный параметр, измерение которого предоставляет оператору необходимую информацию.

Предложено фиксировать момент окончания процесса по величине перепада температур на ледяной шубе десублиматора.

Показано, что на этапе досушивания справедливо:

$$t_A - t_K \approx \frac{2Fn}{F_K \lambda_A} K_c \rho_c \chi_0 (U - U_c) \delta_A. \quad (35)$$

По численной оценке левой части уравнения (35) определено, что измерение конечной влажности материала с точностью  $\pm 1,5\%$  достижимо при точности измерения  $t_A - t_K$ , не превышающей  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Так как измерение температуры  $t_K$  конденсации (или температуры стенки конденсатора) технически просто реализовать, то задача фактически сводится к измерению температуры  $t_A$  поверхности льда.

В соответствии с выводами современной теории десублимации парциальное давление водяного пара вблизи и поверхности вымораживания определяется пограничной кривой насыщенного пара при температуре этой поверхности. Таким образом, измерив величину парциального давления (или равновесную температуру) водяных паров в зоне десублимации, можно определить температуру поверхности ледяной шубы конденсатора-вымораживателя.

Идея, положенная в основу разработанного метода и устройства для измерения равновесной температуры водя-

ного пара в условиях сублимационной сушки, заключается в принудительном поддержании такого температурного режима пластинки льда, при котором сводится к минимуму массообмен между пластинкой и окружающей средой.

Показано, что в этих условиях температура ледяной пластинки равна равновесной. Упрощенная схема устройства приведена на рис. 2.

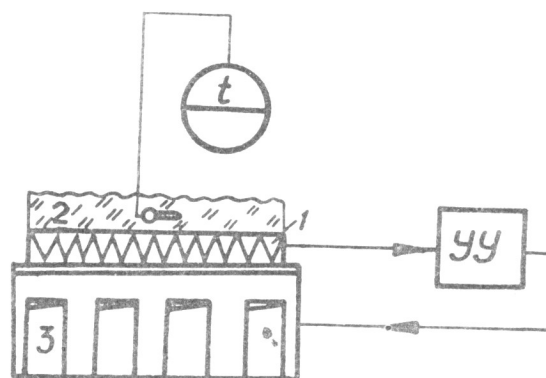


Рис. 2. Устройство измерения равновесной температуры

1. Датчик теплового потока
  2. Пластинка льда
  3. Полупроводниковый холодильник
- УУ. Управляющее устройство

Выполнена оценка фактической точности измерения на специально разработанном стенде.

В качестве метрологического эталона при экспериментальной проверке принимались показания точечных термодпар, измеряющих температуру поверхности ледяной

шубы десублиматора при тепловой нагрузке, равной нулю в условиях насыщения.

Погрешность измерения равновесной температуры, вычисленная по экспериментальным данным, не превышала  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Предложенный способ определения момента окончания процесса апробирован в производственных условиях на сублимационной установке Оршанского мясоконсервного комбината.

Промышленная проверка показала, что завершение процесса при одном из заданных численных значений  $\Delta t_{\text{л}}$  соответствует определенной средней конечной влажности материала с точностью  $\pm 0,5\%$ .

Перепад температур на ледяной шубе, измеренный от первой до предпоследней секции, позволяет зафиксировать момент времени обновления поверхности десублиматора.

Устройство рекомендовано Государственной приемочной комиссией для использования в установках промышленной сублимационной сушки.

## ВЫВОДЫ

1. На основе анализа динамических свойств и особенностей процесса сублимационной сушки показана целесообразность разделения его на две основные стадии:

– стадию сублимации, в течение которой в соответствии с изменяющимися свойствами материала осуществляется управление энергоподводом по "жесткой" временной программе;

– стадию вакуумного досушивания, в течение которой возмущения, обусловленные вариациями свойств сырья, компенсируются в замкнутом контуре регулирования температуры поверхности материала.

2. Разработаны комплексные математические модели сублимационных установок (с электрическими нагревателями и жидким теплоносителем) как объектов управления. Реалистичные (в смысле компромисса между простотой и адекватностью) модельные построения получены на базе анализа математического описания процесса теплообмена на стадии собственно сублимации. При этом установлено, что основным фактором, определяющим передачу энергии к объекту сублимации, является теплопроводность подсыхающего слоя материала, а влияние нестационарности температурного поля слоя и его охлаждение эвакуируемым паром незначительны. Для установок с жидким теплоносителем показана возможность представления теплоподводящих элементов в виде звеньев с сосредоточенными параметрами.

3. Выбраны и обоснованы критерии управления теплоподводом и эффективности работы конденсатора-вымораживателя. Разработаны оптимальные программы теплоподвода для исследуемых материалов, учитывающие влияние роста ледяной шубы на интенсивность процесса, и автоматическая система управления, реализующая их.

4. По результатам исследования математической модели выбраны методы измерения параметров процесса, используемых в АСУ, разработаны рекомендации по улучшению принципиальной схемы теплоподвода в установках с жидким теплоносителем (например, показана возможность исключения из технологической схемы контура охлаждения теплоносителя, что значительно сокращает капитальные затраты на создание системы энергоподвода).

5. Разработанные методы и средства измерения парциального давления водяных паров в сублимационных камерах и определения момента окончания процесса доведены до приборных решений и испытаны в промышленных условиях.

6. Разработанные АСУ изготовлены для одноблочной

автоматизированной установки с электрическими нагревателями (СУ-3, эксплуатируемой в течение четырех лет на Оршанском мясоконсервном комбинате) и трехблочной – с жидким теплоносителем (УСС-5, Детчинский завод пищевых концентратов). Экономический эффект от внедрения системы автоматизации установки СУ-3 составил 60 тыс. руб. Установка рекомендована Государственной приемочной комиссией к серийному производству.

В 1978 г. сдается в промышленную эксплуатацию установка УСС-5.

Разработанные устройства для измерения парциального давления и определения момента обновления поверхности десублимации использованы в проекте автоматизации первой в СССР универсальной поточно-ступенчатой сублимационной установки УСУ-100, изготовление и начало промышленной эксплуатации которой намечены на текущее пятилетие.

#### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы по мере ее выполнения с 1969 г. ежегодно докладывались на заседаниях секции "Разработка методов сублимационного и криогенного консервирования пищевых и биологических материалов" Государственного Комитета Совета Министров СССР по науке и технике, а также на Всесоюзном семинаре "Теория, техника и технология сублимационной сушки", г. Кишинев, 1969 г., Всесоюзной межвузовской конференции "Термические методы обработки при консервировании пищевых продуктов", г. Одесса, 1969 г., III Республиканском семинаре "Динамика тепловых процессов", г. Киев, 1972 г., IУ Республиканском семинаре "Динамика тепловых процессов", г. Киев, 1975 г., Научно-технической конференции "Инженерные методы наладки и внедрения автоматических систем регулирования и автоматических

систем управления технологическими процессами", г. Одесса, 1976 г., Всесоюзной научно-технической конференции "Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники", г. Калинин, 1977 г.

Новизна разработанных в ходе исследований решений по теме диссертационной работы подтверждена авторскими свидетельствами № 316906, № 316907, № 533843.

Автоматизированная установка сублимационной сушки Оршанского мясоконсервного комбината в 1977 году награждена дипломом ВДНХ СССР.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Вопросы исследования процесса сублимационной сушки в установках с лучистым обогревом с целью последующей автоматизации. (в соавторстве). Семинар по теории, технике и технологии сублимационной сушки. Кишинев, 1969.

2. Аналитическое описание процессов теплообмена в слое продукта при сублимационной сушке (в соавторстве). Всесоюзная межвуз. конференция по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов в Одесса, 1969.

3. Математическое описание и моделирование САР теплообменных процессов в сублимационной установке с жидким теплоносителем (в соавторстве). ВНПО "Пищепромавтоматика", Труды и рефераты, вып. 6, Одесса, 1970.

4. Способ определения момента переключения секции конденсатора (в соавторстве). А.с. № 316907.

5. Устройство для определения равновесной температуры (в соавторстве). А.с. № 316903.

6. Исследование процесса сублимационной сушки с целью поиска методов управления и определения структуры САР. "Сб. реф. НИР", серия 19, № 17-18, 1971.

7. Исследование динамики сублимационной сушильной установки (в соавторстве). Сб. "Динамика тепло-

вых процессов". Мат. Ш Респ. семинара. Киев, 1972.

8. Некоторые вопросы аналитического исследования массотеплопереноса при разработке САР процесса периодической сублимационной сушки (в соавторстве). Тр. ВПК и НИИ "Пищепромавтоматика", вып. 11, Одесса, 1973.

9. Исследование процесса сублимационной сушки с целью поиска методов управления и определения структуры САР. "Сб. реф. НИР и ОКР", серия 19, № 4, 1973.

10. Разработка и изготовление систем автоматизации опытно-промышленной сублимационной установки непрерывного действия производительностью 100 кг испаренной влаги в час. "Сб. реф. НИР и ОКР", серия 19, № 6, 1973.

11. Контроль величины парциального давления водяных паров в сублимационной камере (в соавторстве). Тр. ин-та "Пищепромавтоматика", вып. 12-13, Одесса, 1974.

12. Анализ динамических свойств и задач управления сублимационной установкой (в соавторстве). Сб. "Динамика тепловых процессов". Мат. 1У Респ. семинара. Киев, 1975.

13. Способ измерения парциального давления водяных паров в установках сублимационной сушки (в соавторстве). А.с. № 533843.

14. Некоторые вопросы управления сублимационными установками периодического действия (в соавторстве). НПО "Пищепромавтоматика", Сб. научных трудов, вып. 15, Одесса, 1976.

15. Испытание системы автоматического контроля и регулирования трехблочной опытно-промышленной сублимационной установки в комплекте с расфасовочно-упаковочным оборудованием и выдача рекомендаций для серийного производства. Сб. реф. НИР и ОКР, "Пищевая промышленность", № 2, 1976.

16. Оптимальное управление циклическими процессами сублимационной сушки (в соавторстве). Всесоюзная научно-техн. конференция "Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники". Тезисы докладов. Калинин, 1977.

17. Устройство для измерения парциального давления водяных паров и его использование для управления процессом сушки (в соавторстве). Всесоюзная научно-техн. конференция "Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники". Тезисы докладов. Калинин, 1977.

БР 04755 17/У-78 г. Формат 60x84/16. Объем 1,0 печ. л.  
Тираж 150 экз. Заказ № 158.

---

Ротапринт ин-та "Пищепромавтоматика",  
270059 Одесса, ул. Краснова, 6.