

УДК 66.47.25

Десублимация водяного пара на сложноориентированных охлаждаемых поверхностях с различными температурами по секциям

К.Е.АКАЕВ, С.А.СОСУНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

Principles of construction of a physical and mathematical model of water vapor desublimation on complicatedly oriented cooled sections of panels are presented. The experimental test bench and results of experimental testing of the proposed model are presented. A possibility of uniform precipitation of water vapor on the investigated surfaces in case of temperature difference between them 6 – 13 °C is shown.

В сублимационных установках площади поверхности десублимации и сублимации желательно иметь равными. Сублимационные конденсаторы большинства промышленных установок выполнены многосекционными. При этом водяной пар осаждается на первые по ходу секции, что диктует необходимость поочередного включения их в работу, начиная с самой удаленной от сублиматора. В результате часть поверхности в течение всего процесса сублимации неактивна. В случае одновременного включения всех секций обмерзает их начальный участок, хвостовые же части не задействованы.

В связи с вышесказанным достаточно обоснованным и перспективным представляется проведение работ по созданию условий для переноса пара одновременно ко всей охлаждаемой поверхности десублиматора путем регулирования температуры поверхности и геометрической конфигурации отдельных элементов десублиматора.

Исходя из допущения, что главной движущей силой процесса перемещения водяного пара является потенциал переноса, равный разнице между давлением в зоне сублимации и совокупностью сопротивлений движению пара и давления над поверхностью охлаждаемого элемента, разработана физико-математическая модель. Модель учитывает зависимость местоположения зоны десублимации от величины термических и гидравлических сопротивлений движению пара к поверхности:

- сопротивления при течении по каналу, образуемому охлаждаемыми элементами;
- сопротивления при повороте микрообъема водяного пара от направления, установленного вакуум-насосом, к охлаждаемой поверхности;
- термического сопротивления слоя десублимата;
- кроме того, в пространстве возле охлаждаемых поверхностей концентрация неконденсирующихся газов резко возрастает и следует рассматривать процесс

массообмена как диффузионный перенос водяного пара через слой этих газов.

При разработке модели принят ряд допущений:

- распределение температуры в десублимированном слое квазистационарно;
- сопротивлением на границе фазового перехода пренебрегаем;
- содержание неконденсирующихся газов в поступающей смеси – до 4 %;
- температура кипения хладагента в панелях постоянна.

С целью учета локальных сопротивлений переносу микрообъемов паровоздушной смеси плоскость подачи пара из сублиматора и поверхность осаждения разбивают на зоны. Каждая зона на указанной плоскости представляет собой микрообъем водяного пара определенных размеров, с определенными температурой и давлением. В расчетный момент времени для каждой из этих зон рассчитывают потенциал движения к поверхности осаждения и выбирают наибольший из них. Зона поверхности осаждения, для которой потенциал наибольший, считается зоной осаждения. Потенциал осаждения находится как

$$Potenz = p_s - \Sigma \Delta p - p_t, \quad (1)$$

где p_s – давление в плоскости подачи пара;

$\Sigma \Delta p$ – сумма указанных выше гидравлических сопротивлений;

p_t – давление, соответствующее температуре наружного слоя уже намерзшего льда.

Гидравлические сопротивления находятся как

$$(p_1 - p_2) = Q/U, \quad (1a)$$

где Q – поток пара, Н·м/с;

U – проводимость элемента вакуумной системы, м³/с.

Для различных чисел Кнудсена формулы расчета проводимости имеют отличный вид [2, 3].

Неконденсирующиеся газы оттесняются набегающим

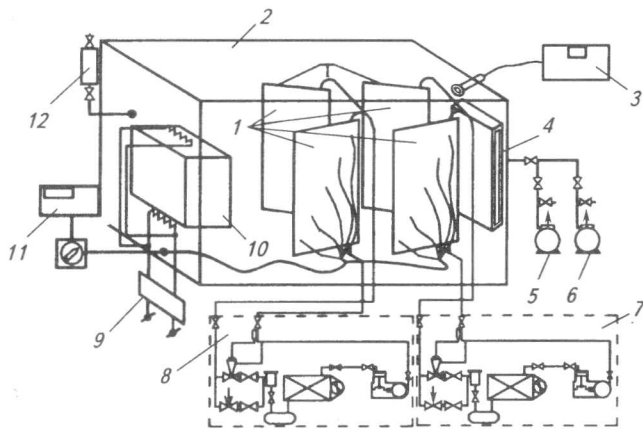


Рис. 1 Экспериментальный стенд: 1 – охлаждаемые элементы; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумметр; 4 – заборник вакуум-насоса; 5 – рабочий вакуум-насос; 6 – пусковой вакуум-насос; 7 – холодильная машина 1; 8 – холодильная машина 2; 9 – блок управления генератора водяного пара; 10 – короб с сублимируемым льдом; 11 – вольтметр универсальный; 12 – натекаль неконденсирующихся газов

потоком пара в направлении движения пара и отсасываются вакуумным насосом. При этом условии поток пара через слой газа выражаем как

$$qm = s \frac{D}{R_n T} \frac{p}{p - p_n} \frac{dp_n}{dl}, \quad (2)$$

где s – площадь зоны десублимации, m^2 ;
 p – давление парогазовой смеси;

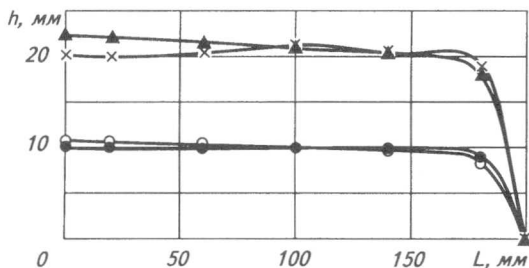


Рис. 2. Профиль десублиматора при тепловой нагрузке 933 Вт/м^2 ; $L_1=110 \text{ мм}$, $L_2=80 \text{ мм}$, $\alpha_1=44^\circ$, $\alpha_2=54^\circ$; $t_1=-24^\circ\text{C}$, $t_2=-33^\circ\text{C}$ (см. рис. 5); $p_s=113 \text{ Па}$; $\times$ – задняя панель (опыт), o – передняя панель (опыт), $\blacktriangle$ – задняя панель (расчет), $\bullet$ – передняя панель (расчет)

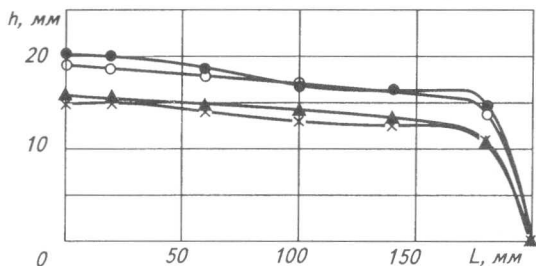


Рис. 3. Профиль десублиматора при тепловой нагрузке 933 Вт/м^2 , $L_1=110 \text{ мм}$, $L_2=80 \text{ мм}$, $\alpha_1=44^\circ$, $\alpha_2=54^\circ$; $t_1=-24^\circ\text{C}$, $t_2=-28^\circ\text{C}$, $p_s=120 \text{ Па}$; $\times$ – задняя панель (опыт), o – передняя панель (опыт), $\blacktriangle$ – задняя панель (расчет), $\bullet$ – передняя панель (расчет)

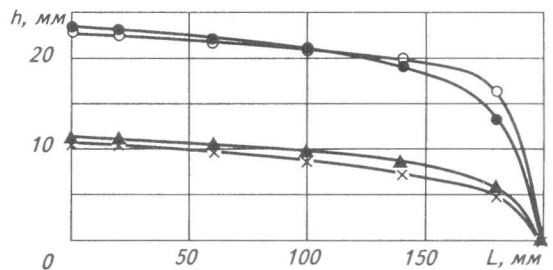


Рис. 4. Профиль десублиматора при тепловой нагрузке 933 Вт/м^2 , $L_1=110 \text{ мм}$, $L_2=80 \text{ мм}$, $\alpha_1=44^\circ$, $\alpha_2=54^\circ$; $t_1=-24^\circ\text{C}$, $t_2=-24^\circ\text{C}$, $p_s=120 \text{ Па}$; $\times$ – задняя панель (опыт), o – передняя панель (опыт), $\blacktriangle$ – задняя панель (расчет), $\bullet$ – передняя панель (расчет)

p_n – парциальное давление водяного пара;
 R_n – газовая постоянная водяного пара, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 T – температура парогазовой смеси.

Для расчета коэффициента диффузии D (m^2/c) воспользуемся [1]:

$$D = 1,12 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{\frac{1}{M_n} + \frac{1}{M_b}}}{(V_n^{1/3} + V_b^{1/3})^2} \frac{T^{5/2}}{p(T + C_{n-b})}, \quad (3)$$

где M_n – молекулярная масса пара;

M_b – молекулярная масса воздуха;

V_n – молярный объем водяного пара;

V_b – молярный объем воздуха;

C_{n-b} – коэффициент бинарной системы,

$$C_{n-b} = 1,47 F' (T_n - T_b)^{0,5}, \quad (4)$$

где T_n – температура пара;

T_b – температура воздуха,

$$F' = 8 \frac{(V_n + V_b)^{0,5}}{V_n + V_b}. \quad (5)$$

Предлагаемая физико-математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ, с помощью которой производится накопление и оптимизация расчетного материала.

Для проверки предложенной схемы процесса и раз-

Перепады давлений в пространстве десублиматора для представленных на рис. 5 вариантов десублимации льда

Условия проведения опытных исследований и математических расчетов	Перепады давлений между точками, соответствующими указанным на рис.5, Па			
		$P_6 - P_1$	$P_6 - P_9$	$P_9 - P_4$
Нагрузка 933 Вт/м^2 , $L_1=110 \text{ мм}$, $L_2=80 \text{ мм}$, $\alpha_1=44^\circ$, $\alpha_2=54^\circ$, $t_1=-24^\circ\text{C}$, $t_2=-33^\circ\text{C}$, $p_s=113 \text{ Па}$ (рис. 2)	опыт	12	40	10
	расчет	10	36	12
нагрузка 933 Вт/м^2 , $L_1=110 \text{ мм}$, $L_2=80 \text{ мм}$, $\alpha_1=44^\circ$, $\alpha_2=54^\circ$, $t_1=-24^\circ\text{C}$, $t_2=-28^\circ\text{C}$, $p_s=120 \text{ Па}$ (рис. 3)	опыт	23	46	5
	расчет	22	45	7
нагрузка 933 Вт/м^2 , $L_1=110 \text{ мм}$, $L_2=80 \text{ мм}$, $\alpha_1=44^\circ$, $\alpha_2=54^\circ$, $t_1=-24^\circ\text{C}$, $t_2=-24^\circ\text{C}$, $p_s=120 \text{ Па}$ (рис. 4)	опыт	31	50	4
	расчет	29	48	5

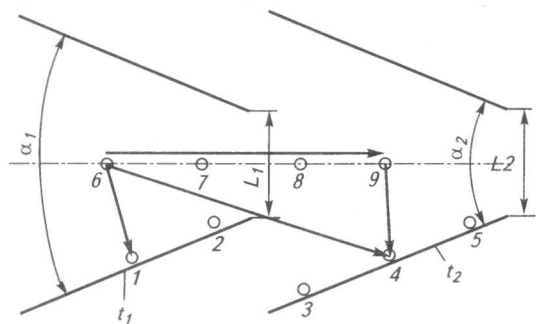


Рис. 5. Взаимное расположение панелей в эксперименте:
 α_1, α_2 — угол между панелями; L_1, L_2 — расстояние между панелями; t_1, t_2 — температуры панелей

работанной физико-математической модели создан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1. Исследуемые объекты — две расположенные друг за другом пары (секции) панелей 1 с различными температурами, создаваемыми двумя холодильными машинами 7 и 8. Угол между панелями каждой секции можно менять. Будем называть ближнюю к зоне сублимации пару панелей — передней, дальнюю — задней.

На рис. 2 — 4 представлены опытные и расчетные профили десублимата для нескольких вариантов температурных и геометрических параметров десублиматора, в таблице — перепады давлений для указанных условий, а на рис. 5 изображено взаимное расположение панелей.

В случае, представленном на рис. 2, температурный перепад на панелях по ходу пара составляет 9 °С, что

определяет более высокую интенсивность осаждения на задние поверхности (десублимация на задних поверхностях происходит интенсивнее, чем на передних).

Из рис. 3 и 4 видно, что при уменьшении перепада температур между панелями с 4 (см. рис. 3) до 0 °С (см. рис. 4) доля осажденного на переднюю панель пара растет.

При уменьшении L_1 и L_2 (см. рис. 5) в хвостовой части передних и задних панелей для достижения того же перераспределения десублимата требуется больший температурный перепад, что можно объяснить увеличением аэродинамического сопротивления канала.

В пределах накопленного материала можно с уверенностью говорить о возможности равномерного осаждения водяного пара на поверхностях десублиматов исследованной геометрии при наличии разности температур между секциями 6...13 °С. Влияние других параметров на равномерность осаждения требует дополнительных расчетного и натурного эксперимента.

Список литературы

1. Аношин И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств. —М.: Пищевая промышленность, 1970.
2. Фролов Е.С., Минайчев В.Е. Вакуумная техника: Справочник. — М.: Машиностроение, 1992.
3. Шумский К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения. — М.: Машиностроение, 1967.