

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР Б. В. ДЕРЯГИН, И. Н. ГОУФМАН,  
А. Г. АМЕЛИН и С. М. ЛЕВИ

ТЕОРИЯ ТЕРМОГРАДИЕНТНОЙ СУШКИ ПЛЕНОЧНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Существующие методы сушки тонких слоев, нанесенных на гибкие подложки, страдают рядом существенных недостатков: значительная продолжительность сушки, часто неблагоприятно влияющая на свойства сушимого материала, большие габариты сушилки, а также опасность порчи материала за счет попадания на него во время сушки пылинок.

Мы полагаем, что от этих недостатков свободна следующая схема сушки\* (см. рис. 1), основанная на создании градиента температур, направленного вглубь сушимой пленки. Поверхность сушимого слоя  $SS$  поддерживается при максимальной температуре  $t_1$ , допустимой по соображениям технологии сушимого материала, с помощью теплового экрана  $KK$ , расположенного со стороны подложки на расстоянии  $M$ ; со стороны слоя на расстоянии  $H$  расположена поверхность конденсатора  $UU$ , охлаждаемая с помощью холодильной смеси до температуры  $t_2$ .

Рассмотрим механизм и скорость влагоудаления с поверхности  $SS$ . Воздух вблизи этой поверхности имеет меньшую плотность, чем вблизи поверхности конденсации, вследствие более высокой температуры и более высокого влагосодержания. Возникает конвекция по направлению контура  $ABCD$ , изображенного на рис. 1. При достаточной длине поверхности  $SS$  образуется несколько ячеек, в каждой из которых имеет место циркуляция по замкнутому контуру. В результате конвекции влажный воздух, проходя на пути  $CD$  вблизи поверхности конденсатора, отдает ей влагу, осушается и подходит к поверхности  $SS$  в точке  $A$  сухим, на пути  $AB$  насыщаясь влагой до влажности, приближающейся к насыщающей при температуре  $t_1$ .

Таким образом, скорость сушки, равная удельному потоку влаги

$$W_h (\text{г/см}^2 \cdot \text{сек}) = \beta_h (d_1 - d_2), \quad (1)$$

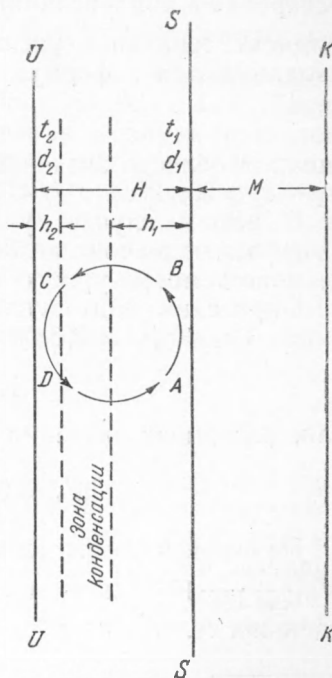


Рис. 1

\* Схема сушки разработана в процессе проверки изобретения И. Н. Гоуфмана и А. Н. Гоуфмана (авт. свид. № 89181).

где  $\beta_k$  (см/сек) — коэффициент передачи массы (влаги),  $d_1$  и  $d_2$  — влаго-содержания (г/см<sup>3</sup>) у поверхностей испарения и конденсации, зависит от интенсивности свободной конвекции, определяющей приведенные толщины диффузионных пограничных с обеими стенками слоев воздуха. Выражая  $\beta_k$  через диффузионный критерий Нуссельта <sup>(1)</sup>, получим:  $\beta_k = Nu_d \frac{D}{H}$ , где  $D$  — коэффициент диффузии водяных паров в воздухе.

Предполагая поверхности конденсатора и пленки неограниченными и учитывая наличие только стационарной свободной конвекции, из общей теории подобия можем написать:

$$Nu_d = f(Ar, Pr_d), \quad (2)$$

где  $Pr_d = \nu/D$  — диффузионный критерий Прандтля;  $\nu$  — кинематическая вязкость;  $Ar = \frac{gH^3(\rho_2 - \rho_1)}{\nu^2 \rho_{cp}}$  — критерий Архимеда, в котором  $g$  — ускорение тяжести,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и  $\rho_{cp}$  — соответствующие плотности влажного воздуха у поверхности испарения и конденсации и средняя.

Ввиду аналогии уравнений влаго- и теплопередачи (при сильном разбавлении пара воздухом <sup>(1)</sup>) вид функции  $f(Ar, Pr_d)$  не должен отличаться от вида функциональной зависимости

$$Nu_c = f(Ar, Pr_c), \quad (3)$$

где  $Nu_c$  и  $Pr_c$  — тепловые критерии Нуссельта и Прандтля.

Для частного случая чисто тепловой конвекции (в отсутствие испарения и конденсации), когда  $Ar = Gr = \beta \frac{gH^3}{\nu^2} (t_1 - t_2)$ , где  $\beta$  — коэффициент теплового расширения, экспериментальные данные хорошо укладываются в формулу <sup>(2, 3)</sup> \*

$$Nu_c = A (Gr \cdot Pr_c)^n, \quad (4)$$

где для области значений  $Gr$ , отвечающих рассматриваемой задаче \*\* ( $t_1 - t_2 \cong 50$ ; 1 см <  $H$  < 20 см), можно принять <sup>(2)</sup>\*\*\*  $A = 0,18$ ,  $n = 1/4$ .

В нашем случае, учитывая отношение средних температурных коэффициентов плотности влажного и сухого воздуха для рассматриваемого температурного интервала, мы имеем:  $Ar > Gr$ .

Определив вид функции  $f(Ar, Pr)$  и беря для паро-воздушной смеси  $Pr_d = \nu/D = 0,6$ , мы вместо (2) найдем:

$$Nu_d = 0,18 (0,6)^{1/4} (Ar)^{1/4}, \quad (5)$$

или, раскрывая значения критериев:

$$W_k = 0,89 \frac{D}{\nu^{1/2}} \frac{d_1 - d_2}{H^{1/4}} \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_{cp}} \right)^{1/4} ****. \quad (6)$$

На основании полученной формулы была составлена табл. 1 значений  $W_k \left( \frac{г}{см^2 \cdot сек} \cdot 10^{-5} \right)$  для разных температурных интервалов и численных значений  $H$ .

\* Ламинарная конвекция ( $Nu_c = 1$ ), соответствующая точному решению рассматриваемой гидродинамической задачи, устойчива только при  $Gr \cdot Pr \ll 10^3$  <sup>(3, 8)</sup>.

\*\* Примерно для интервала  $Gr$  от  $10^4$  до  $10^8$ .

\*\*\* Для случая одной пластинки значение  $n = 1/4$  обосновано теоретически В. Г. Левичем <sup>(9)</sup>.

\*\*\*\* Настоящая формула строго справедлива только для материалов, у которых большая часть процесса протекает в период постоянной скорости сушки. Для них значение  $d_1$  может быть принято за постоянную величину. К числу таких материалов, как это показал И. М. Федоров <sup>(4)</sup>, может быть отнесена фотографическая эмульсия, для которой прежде всего нами и рекомендуется термоградиентный способ сушки.

Для частного случая сушки кино- или фотопленки допустимо брать  $t_2 = 0^\circ$ ,  $t_1 = 50^\circ$  (учитывая, что сушка в этих условиях продолжается короткое время). Получающаяся согласно таблице продолжительность сушки при  $H = 7$  см составляет для слоя толщиной 150  $\mu$  примерно 10 мин.

Необходимо, кроме того, отметить, что при падении температуры, направленном от подложки к эмульсионному слою, т. е. в направлении перемещения влаги в сушимом материале, создаются условия, гарантирующие последний от возникновения на нем корочки, мешающей удалению влаги при противоположном направлении градиента температуры.

Одновременно рассматриваемая схема сушки радикально устраняет и опасность запыления сушеного слоя. Действительно, как хорошо известно <sup>(5)</sup>, любые взвешенные в воздухе частицы стремятся двигаться по отношению к нему в направлении, прямо противоположном температурному градиенту  $dt/dh$ , т. е. как бы отталкиваясь от нагретой поверхности со скоростью  $u = K dt/dh$ , где  $K$  не зависит от размеров частиц и имеет величину порядка  $10^{-4} \frac{\text{см}^2}{\text{сек} \cdot \text{град}}$ . В результате, не только пылинки не будут осаждаться на сушимом слое, но у поверхности последнего образуется слой воздуха, свободный от пыли. Таким образом, отпадает необходимость обеспыливания воздуха сушилки.

Приведенные расчеты скорости сушки предполагают, что конденсация паров имеет место только на поверхности конденсатора. Это молчаливое допущение, однако, нуждается в исправлении, так как, следуя А. Г. Амелину, можно показать, что в значительной части сушильного пространства возникает пересыщение паров, ведущее к объемной конденсации и образованию тумана. Для расчета этого пересыщения <sup>(6)</sup> исходим из уравнения, связывающего одновременно текущие процессы переноса влаги и тепла:

$$\frac{dp}{dt} = \delta \frac{p - p_2}{t - t_2}, \quad (7)$$

где  $p$  и  $t$  — давление водяных паров и температура воздуха в рассматриваемой точке пространства;  $p_2$  и  $t_2$  — значения соответствующих величин у поверхности конденсатора;  $\delta$  — числовой коэффициент, равный единице при больших числах Рейнольдса, а для иных его значений для водяного пара при  $0^\circ < t < 100^\circ$  близкий к 1,1.

Интегрирование уравнения (7), начиная от значений  $p = p_1$  и  $t = t_1$ , дает:

$$S = \frac{p}{p_n} = \left( \frac{t - t_2}{t_1 - t_2} \right)^\delta \frac{p_1 - p_2}{p_n} + \frac{p_2}{p_n}, \quad (8)$$

где  $p_n$  — давление насыщенного пара при температуре  $t$ ,  $S$  — пересыщение в рассматриваемом месте.

Как показал А. Г. Амелин <sup>(6)</sup>, функция  $S(t)$  имеет максимум при  $t = t_m$ , где  $t_2 < t_m < t_1$ , принимая значение  $S = 1$  при  $t = t_1$  и  $t = t_2$ .

Отсюда следует, что во всем сушильном объеме  $S > 1$ . Ширина и положение зоны объемной концентрации и образования тумана

Таблица 1

$t_2$ в°	$t_1$ в°	H в см				
		3	5	7	10	2 t
0	55	2,88	2,52	2,30	2,12	1,79
0	50	2,13	1,82	1,72	1,59	1,30
0	45	1,60	1,41	1,29	1,19	1,00
5	55	2,72	2,42	2,20	2,02	1,71
10	55	2,60	2,28	2,10	1,94	1,63
15	55	2,45	2,16	1,97	1,83	1,53
10	50	1,92	1,69	1,55	1,39	1,23
15	50	1,77	1,57	1,43	1,33	1,11

будут зависеть от наличия и рода ядер конденсации (гигроскопические пылинки, тяжелые ионы и др.), определяющих уровень критического пересыщения  $S_0 > 1$ , являющегося медленно убывающей функцией от  $t$ . Поэтому зона объемной конденсации будет удалена от поверхностей пленки и конденсатора соответственно на расстояния  $h_1$  и  $h_2$ . Учитывая, что в нашем случае  $p_2 \ll p_1$ , можно показать, что  $t_m - t_2 \ll t_1 - t_m$ , откуда далее следует, что  $h_2 \ll h_1$ , т. е. что зона конденсации расположена асимметрично, значительно ближе к конденсатору, чем к поверхности испарения.

Другой особенностью рассматриваемого метода сушки является то, что благодаря термофорезу не только ядра конденсации и пылинки, но и выросшие на них капельки воды будут двигаться по направлению к конденсатору (помимо их увлечения конвекционными токами). Этот перенос будет усиливать перенос влаги, т. е. ускорять сушку и одновременно способствовать обеспыливанию сушильного объема.

В том же направлении, что и термофорез, повидимому, действуют силы диффузионного происхождения, зависящие от диффузионных потоков у поверхностей растущих капель и конденсатора и вызывающие кажущееся притяжение капель к поверхности конденсатора. Помимо этого асимметрия области водного тумана, усиленная переносом капелек к конденсатору, будет увеличивать интенсивность конвекции, а следовательно, и сушки за счет утяжеления объема воздуха, прилегающего к конденсатору.

Точно учесть влияние тумана на скорость сушки крайне трудно, к тому же этот учет требует знания концентрации ядер конденсации, могущей меняться даже в течение самого процесса сушки; несомненно, однако, что это влияние положительно, т. е. повышает скорость сушки по сравнению с данными, рассчитанными по уравнению (6), и одновременно усиливает гарантию от запыления пленки.

При экспериментальной предварительной проверке, проводившейся при горизонтальном расположении пластин конденсатора и испаряющей поверхности, было получено  $W_k$  порядка  $2,5 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>2</sup>·сек. Подставляя экспериментальные данные ( $t_1 = 40^\circ$ ,  $t_2 = 5^\circ$ ,  $H \approx 2$  см) в формулу (6), получаем  $W_k = 1,2 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>2</sup>·сек\*. То, что экспериментальная скорость сушки в два раза больше вычисленной, повидимому, следует приписать влиянию туманообразования, не учитываемому формулой (6).

В заключение считаем необходимым с благодарностью отметить ценные советы, данные нам проф. О. М. Тодес.

Поступило  
27 VI 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Д. А. Франк-Каменецкий, ЖТФ, 12, 327 (1942); А. Г. Амелин, ЖТФ, 15, 287 (1945). <sup>2</sup> М. В. Кирпичев, М. А. Михеев, Д. С. Эйгенсон, Теплопередача, М.—Л., 1940. <sup>3</sup> М. А. Михеев, Основы теплопередачи, М.—Л., 1949. <sup>4</sup> И. М. Федоров, Основные расчеты процессов и аппаратов фотохимической технологии, М., 1947. <sup>5</sup> R. L. Saxton, W. E. Ranz, J. Appl. Phys., 23, 917 (1952). <sup>6</sup> А. Г. Амелин, Теоретические основы образования тумана в химических производствах, М.—Л., 1951. <sup>7</sup> В. С. Жуковский, Тр. Гос. физ.-техн. ин-та, в. 9 (1929). <sup>8</sup> Г. А. Остроумов, Свободная конвекция в условиях внутренней задачи, М.—Л., 1952. <sup>9</sup> В. Г. Левич, Физико-химическая гидродинамика, М.—Л., 1952.

\* Использование формулы, полученной для вертикального положения пластинок, в случае горизонтального их расположения, который имел место в опыте, основано на работе В. С. Жуковского (?), показавшего малую зависимость конвекционного теплообмена от угла наклона пластин.