

А. А. ДУДАРЬ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ НАГРЕВЕ
И ОХЛАЖДЕНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА**

Минимальные напряжения в деталях остекления из органического стекла после формования обуславливаются температурой заготовки в конце формования. Эта температура должна соответствовать режиму высокой эластичности и для органического стекла марки СО-120 составляет 140°C . Отклонение режима формования в сторону более низких температур приводит к появлению остаточных напряжений.

Формование ответственных деталей остекления в связи с этим сопровождается контролем температуры заготовки. Сверление каждой заготовки, надежное крепление термопары в целях обеспечения теплового контакта наличие проводов от термопары к прибору представляет определенные трудности при формовании в условиях производства.

Наличие же графической температурно-временной зависимости дает возможность исключить необходимость проведения кропотливых замеров температур и ограничиться только отсчетом времени отдельных элементов рабочего цикла всего процесса.

Исследования проводились на образцах органического стекла разных толщин медно-константановыми термопарами, головка датчика которых выполнена в виде плоского (по толщине, равной $0,1\text{ мм}$) диска. Такая форма и толщина датчика выполнена из необходимости иметь малую тепловую инерционность.

Кроме того, это позволяет производить более точные исследования температур в различных слоях стекла по толщине, в том числе и в поверхностном слое.

Схема расположения датчиков термомпар на разном уровне по толщине и в плане показана на рис. 1.

Термограммы нагрева образцов в печи и охлаждения их в спокойном подвешенном состоянии показаны на рис. 2. Анализируя термограммы нагрева и охлаждения, следует отметить, что в производственной печи с перемешиванием воздуха полный прогрев за-

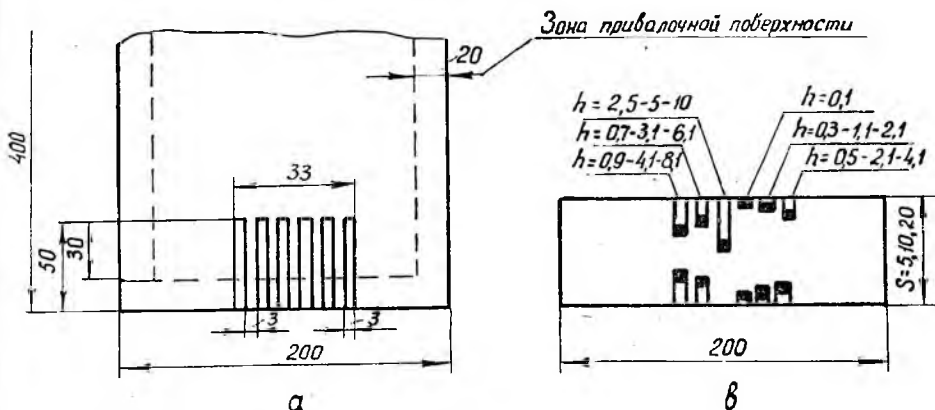


Рис. 1. Схема расположения датчиков термомпар в оргстекле — в плане; — по толщине стекла.

Примечание: глубины термомпар с одной стороны и с другой стороны оргстекла выполнены идентично.

готовок толщиной 20 мм с момента завешивания достигается в течение 90 минут. Наибольший интерес представляет анализ кривых охлаждения и определение $\tau_{\text{опт}}$ для соответствующих толщин стекла, наличие которого упрощает исполнение технологических режимов при формовании.

При формовании заготовок из органического стекла с подстуживанием, которое имеет место чаще всего при контактном формовании, время их выдержки после выгрузки из печи до конца формования значительно превышает $\tau_{\text{опт}}$.

Для того, чтобы знать, как такое подстуживание отразится на дальнейшей работе деталей остекления, необходимо представить, как в этом случае изменяется температура по толщине стекла.

Экспериментальное исследование распределения температуры по толщине органического стекла в производственных условиях представляет известные трудности и занимает продолжительное время, поэтому нами сделана попытка получить такое распределение расчетным путем.

Расчет произведен с использованием критериальных зависимостей теплопередачи: Нуссельта, Прандтля, Био и Грасгофа, с учетом физических параметров органического стекла СО-120 и воздушной среды.

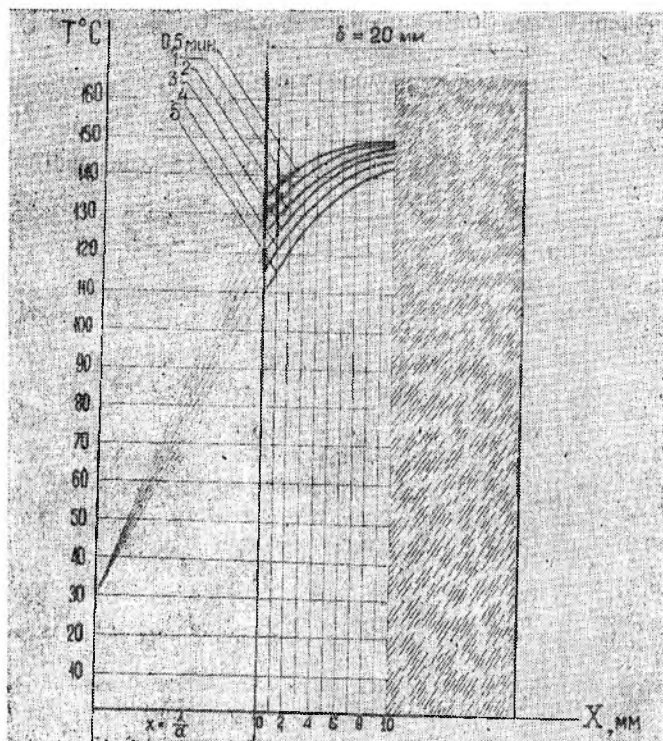


Рис. 2. График нагрева и охлаждения оргстекла марки СО-120 $\delta = 20$ мм.

Расчет изменения температуры по толщине заготовки органического стекла марки СО-120 при охлаждении

Физические параметры материала:

коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,156$ ккал/м час град; удельный вес $\gamma = 1189$ кг/м³;

коэффициент теплоемкости $C = 0,413$ ккал/кг град;

коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = \frac{0,156}{1189 \times 0,413} = 0,000317 \text{ м}^2/\text{час}. \quad (1)$$

В нашем случае имеет место лучистый теплообмен среды с поверхностью нагрева и конвективный теплообмен в условиях свободного потока. В этом случае коэффициент общего теплообмена среды с поверхностью нагрева путем излучения и конвекции будет:

$$\alpha_F = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{луч}} \quad (2)$$

α_F — коэффициент общего теплообмена ($\text{ккал}/\text{м}^2 \text{ час град}$);
 $\alpha_{\text{луч}}$ — коэффициент лучистого теплообмена;
 $\alpha_{\text{конв}}$ — коэффициент конвективного теплообмена;
 Коэффициент лучистого теплообмена определяется отношением:

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{\frac{\varepsilon_{г.т}}{A_{г1} T_F} \cdot 4,9 \left(\frac{T}{100}\right)^4 - \frac{\varepsilon_F}{A_F} \cdot 4,9 \left(\frac{T_F}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{A_{г1} T_F} + \frac{1}{A_F} - 1\right)(t_0 - t_F)} \quad (3)$$

t_F — температура стенки ($^{\circ}\text{C}$);
 t_0 — температура окружающего воздуха ($^{\circ}\text{C}$);
 $\varepsilon_{г.т}$ — коэффициент черноты излучения среды;
 $A_{г1} T_F$ — коэффициент поглощения среды.
 Для данного материала $A_{г1} = \varepsilon_F = 0,91$. Для воздуха количество $\text{CO}_2 = 0,03\%$ $\text{H}_2\text{O} = 1,2\%$ [1]. Средняя длина пути излучения или поглощения определяется отношением:

$$\bar{e} = 0,9 \frac{4V}{F}, \quad (4)$$

где

$$V = 0,0016 \text{ м}^3;$$

$$F = 0,184 \text{ м}^2;$$

$$\bar{e} = 0,9 \frac{4 \times 0,0016}{0,184} = 0,03125 \text{ м.}$$

При общем давлении воздуха $P = 1 \text{ ат}$ парциальное давление углекислого газа и водяного пара составит:

$$P_{\text{CO}_2} = 0,0003 \text{ ат}; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,012 \text{ ат.}$$

Толщина слоев излучающего газа, соответственно этому давлению, получается равной:

$$(P\bar{e})_{\text{CO}_2} = 0,0003 \times 3,125 = 0,0009375 \text{ ат. см};$$

$$(P\bar{e})_{\text{H}_2\text{O}} = 0,12 \times 3,125 = 0,375 \text{ ат. см.}$$

Из графиков зависимости излучательная способность CO_2 в зависимости от температуры и условной толщины слоя $l = PS$ и излучательная способность H_2O в зависимости от температуры и условной толщины слоя $l = PS/\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = x\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$ находим: для температуры воздуха 30°

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,003; \quad \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = x \cdot \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,003;$$

для температуры стенки 150°

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,003; \quad \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,003.$$

Общий коэффициент черноты излучения или поглощения воздуха

можно определить суммированием коэффициентов черноты излучения или поглощения CO_2 и H_2O :

$$\begin{aligned} \text{для } t_0 = 30^\circ \quad \varepsilon_r, \tau = 0,006; \\ \text{для } t_F = 150^\circ \quad \varepsilon_r, \tau_F = 0,006. \end{aligned}$$

По формуле (3) находим коэффициент лучистого теплообмена излучающей степени из материала СО-120 с окружающим воздухом

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{0,006 \cdot 4,9 \left(\frac{30 + 273}{100} \right)^4 - 0,9 \cdot 4,9 \left(\frac{150 + 273}{100} \right)^4}{\left(\frac{1}{0,006} + \frac{1}{0,9} - 1 \right) (30 - 150)} = 2,92.$$

Коэффициент $\alpha_{\text{кон}}$ можем определить, исходя из подобия тепловых процессов. Уравнение подобия тепловых процессов имеет вид [2]:

$$Nu = f(Pr, Gr). \quad (5)$$

Критерии Gr и Pr являются определяющими, так как состоят из известных величин v , a , h , β , Δt и g заданных в условиях однозначности.

Причем: λ — коэффициент теплопроводности (ккал/м час град);

ν — коэффициент кинематической вязкости ($\text{м}^2/\text{сек}$);

a — коэффициент температуропроводности ($\text{м}^2/\text{час}$);

λ , ν , a — физические параметры теплоносителя;

β — коэффициент объемного расширения теплоносителя

($\frac{1}{\text{град}}$);

$\Delta t = t_F - t_0$ — разность температур поверхности стенки и окружающей среды;

g — ускорение силы тяжести ($\text{м}/\text{сек}^2$).

Коэффициент объемного расширения газа принимается равным:

$$\beta = \frac{1}{t_{\text{ср}} + 273^\circ}, \quad (6)$$

где

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_F + t_0}{2}. \quad (7)$$

Критерий Nu является критерием теплового подобия. Для определения этого критерия необходимо знать коэффициент теплоотдачи α .

$$\text{Критерий Нуссельта} - Nu = \frac{\alpha \cdot h}{2}. \quad (8)$$

Критерий Pr является безразмерным физическим параметром теплоносителя.

$$\text{Критерий Прандтля} - Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (9)$$

Величина этого критерия зависит от физической природы, а также температуры и давления теплоносителя и задается в виде таблиц [2].

Для большинства газов величина Pr весьма слабо зависит от

температуры и давления, но изменяется в зависимости от атомности газа [2]:

атомность —	1	2	3	4
Pr	— 0,67	0,72	0,8	1,0

Критерий Gr является критерием кинематического подобия для процессов теплоотдачи при свободном движении теплоносителя.

$$\text{Критерий Грасгофа} — Gr = \frac{g \beta \Delta t h^3}{\nu} \quad (10)$$

Результаты многочисленных опытов по изучению теплоотдачи горизонтальных и вертикальных цилиндров, шаров, пластин и других тел, находящихся в большом объеме различных теплоносителей, были представлены в виде связи между критериями подобия. Как показал М. А. Михеев [3] экспериментальные результаты этих опытов достаточно хорошо описываются уравнением подобия в виде:

$$Nu = c (Gr \times Pr) \quad (11)$$

При этом для функции Ф подобрана следующая интерполяционная формула:

$$\overline{Nu} = c (\overline{Gr} \times \overline{Pr})^n \quad (12)$$

где \overline{Nu} , \overline{Gr} , \overline{Pr} , \overline{x} — среднее значение.

Величина c и n в этой формуле для отдельных областей изменения $(Gr \times Pr)$, согласно данным М. А. Михеева, могут быть приняты:

$Gr \times Pr$	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^2$	$5 \times 10^2 - 5 \times 10^2$	$5 \times 10^2 - 2 \times 10^7$	$2 \times 10^7 - 1 \times 10^8$
c	1,18	0,54	—	0,135
n	1/8	1/4	—	1/3

Значение показателя степени принимаем равным $1/4$, что соответствует локонообразному движению теплоносителя.

Все расчеты сведены в таблицу № 1.

Для вычисления распределения температуры предварительно находим критерий БИО (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} \quad (13)$$

где h — толщина стенки.

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \Delta \theta \quad (14)$$

θ — разность между переменной и постоянной температурой тела и окружающей среды.

Уравнение теплопроводности имеет частные решения [2]

$$\Theta = A \cdot e^{-\varepsilon^2 a \tau} \cdot \cos(\varepsilon \cdot x), \quad (15)$$

$$\Theta = B \cdot e^{-\varepsilon^2 a \tau} \cdot \sin(\varepsilon \cdot x), \quad (16)$$

где ε — вещественное положительное число;

A и B — произвольные постоянные интегрирования.

Применяя пограничное условие третьего рода имеем:

$$\left| \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right|_F = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \Theta_F. \quad (17)$$

Используя частное решение для Θ и производя дифференцирование, получаем:

$$-\varepsilon A \sin\left(\varepsilon \cdot \frac{h}{2}\right) e^{-\varepsilon^2 a \tau} = -\frac{\alpha}{\lambda} A \cos\left(\varepsilon \cdot \frac{h}{2}\right) e^{-\varepsilon^2 a \tau}$$

или после сокращений $\varepsilon \operatorname{tg}\left(\varepsilon \cdot \frac{h}{2}\right) = \frac{\alpha}{\lambda}$.

Обозначая $\varepsilon \cdot \frac{h}{2} = \delta$ и имея в виду, что $\frac{\alpha \cdot h}{\lambda} = Bi$, имеем следующее трансцендентное уравнение:

$$\delta \operatorname{tg} \delta = Bi, \quad (18)$$

Вычисляем корни трансцендентного уравнения (18). При вычислении ограничиваемся первыми двумя корнями, так как остальные оказывают мало заметное влияние на величину суммы в формуле для распределения температуры.

Корни трансцендентного уравнения соответственно будут равны:

$$\delta_1 = 0,776; \quad \delta_2 = 3,363.$$

Применяя пограничное условие задачи, имеет бесчисленное множество решений уравнения теплопроводности стенки в виде формул для Θ_i :

$$\Theta = A_i \cos\left(\delta_i \cdot \frac{X}{\frac{h}{2}}\right) e^{-\delta_i^2 \frac{a \tau}{\left(\frac{h}{2}\right)^2}}, \quad (19)$$

в которых δ_i — корни уравнения (18), а безразмерный параметр $\frac{a \tau}{\left(\frac{h}{2}\right)^2}$ характеризующий нестационарную теплопроводность, именуют критерием Фурье и обозначают

$$F_0 = \frac{a \tau}{\left(\frac{h}{2}\right)^2}. \quad (20)$$

Находим критерий F_0 для

$$\begin{aligned} \tau = 14 \text{ сек}; \quad \tau = 30 \text{ сек}; \quad \tau = 1 \text{ мин}; \quad \tau = 2 \text{ мин}; \quad \tau = 3 \text{ мин}; \\ \tau = 4 \text{ мин}; \quad \tau = 5 \text{ мин}. \end{aligned}$$

№ п/п	τ (час)	F_0	$\delta_1^2 F_0$	$\delta_2 F_0$	$e^{-\delta_1^2 F_0}$	$e^{-\delta_2^2 F_0}$	$\frac{\theta_F}{\theta_a}$	$\frac{\theta_m}{\theta_a}$	t_F	t_m
1	0,003889	0,012328	0,007424	0,1398	0,9926	0,869447	0,8846		136,3°	
2	0,00833	0,02639	0,016	0,3	0,9842	0,7408	0,87	0,9971	134°	149,6°
3	0,01666	0,5278	0,0318	0,6	0,9688	0,5488	0,827	0,9965	129°	149,5°
4	0,03332	0,10556	0,0636	1,2	0,94146	0,3012	0,77455	0,9957	123°	149,4°
5	0,04998	0,15334	0,0954	1,8	0,90898	0,1653	0,73253	0,9772	118°	147°
6	0,06664	0,21112	0,1272	2,4	0,88056	0,09072	0,70113	0,9552	114°	145°
7	0,0833	0,2639	0,16	3	0,853	0,04979	0,6612	0,95	109°	144°

8. $h = 0,2$ м; Gr = 0,04904 × 10⁴; Pr = 0722; Gr + Pr = 0,03541 × 10⁸; Bi = 08;

9. $\alpha_{\text{конт}} = 9,55$; $\alpha_{\text{луч}} = 2,92$; $\alpha_F = 12,47$;

10. $\delta_1 = 0,766$; $\delta_2 = 3,368$; $\delta_1^2 = 0,6022$; $\delta^2 = 11,34$;

11. $\varphi_1 = 44^\circ 28'$; $\varphi_2 = 193^\circ 4'$; $\sin \varphi_1 = 0,7005$; $\sin \varphi_2 = 0,2261$;

12. $\cos \varphi_1 = 0,7137$; $\cos \varphi_2 = -0,9741$.

В связи с тем, что в нашем случае охлаждение двухстороннее, толщину стенки берем $= \frac{h}{2}$.

После решения уравнения теплопроводности имеем: для температуры в середине стенки при $X=0$:

$$\Theta_{m, \tau} = \Theta_a \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cdot \cos \delta_i} \cdot e^{-\delta_i^2 F_0}, \quad (21)$$

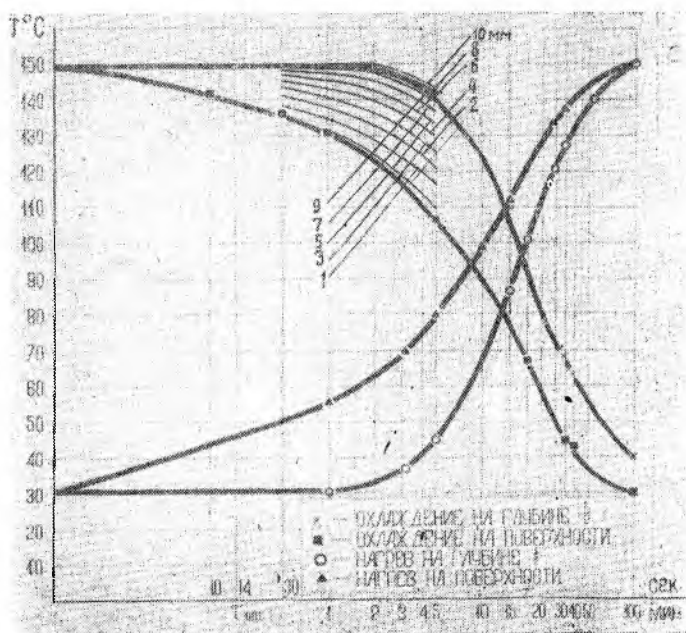


Рис. 3. График распределения температуры по толщине охлаждаемого оргстекла марки СО-120.

для температуры на поверхности стенки при $X = \pm \frac{h}{2}$:

$$\Theta_{F, \tau} = \Theta_a \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{2 \sin \delta_i \cdot \cos \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cdot \cos \delta_i} \cdot e^{-\delta_i^2 F_0} \quad (22)$$

Вычислив для отдельных моментов времени температуру в середине на поверхности стенки (см. таблицу № 1), можно наметить линии измерения температуры в толщине стенки. Для этого на поверхности стенки в ее середине наносим точки, соответствующие вычисленным температурам (рис. 3). Имея в виду, что наклон линии изменения температуры в толще стенки от поверхности определяется уравнением (17), замечаем, что для любой Θ_F на по-

верхности $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ есть направление луча, исходящего из точки A , отстоящей от стенки на расстоянии $x_0 = \frac{\lambda}{\alpha}$ и имеющей $\Theta = 0$.

Проведя из точки A лучи, соответствующие вычисленным для отдельных моментов времени, отмечаем приблизительно, линии изменения температуры в толщине стенки; при этом в середине стенки изменения температуры имеют симметричный изгиб в сторону другой поверхности стенки.

На рис. 2 толстыми линиями обозначены термограммы, полученные экспериментально, а тонкими — расчетные.

Каждая кривая показывает изменения температуры в точках, расположенных на расстоянии одного mm друг от друга, причем кривая № 1 соответствует температуре на поверхности, а кривая № 11 на глубине 10 mm .

Расчетные данные, как видно из рис. 2, близко совпадают с экспериментальными.

Анализируя полученные данные следует отметить, что при формировании заготовки органического стекла толщиной 20 mm охлажденной на воздухе в течение 1 минуты, подстуженные слои составляют толщину 2 mm , а при охлаждении в течение 2 и 3-х минут эти слои растут соответственно до 4 и 5 mm .

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Кутателадзе, В. М. Бориканский, Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
 2. С. Н. Шорин. Теплопередача, Изд-во «Высшая школа», М 1964
 3. М. А. Михеев. Основы теплопередачи, М. П. Госэнергоиздат, 1956.
-