

УДК 658.52

Дата подачи статьи: 02.12.16

DOI: 10.15827/0236-235X.117.148-151

2017. Т. 30. № 1. С. 148–151

ПРОГРАММА ИДЕНТИФИКАЦИИ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ

Б.И. Марголис, д.т.н., зав. кафедрой, borismargolis@yandex.ru
(Тверской государственной технической университет,
наб. Аф. Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Россия)

Рассмотрена постановка задачи идентификации условий теплообмена для изделия плоской формы при несимметричном конвективно-радиационном теплообмене поверхностей изделия с окружающей средой и ограждающими поверхностями (нагревательными элементами) технологического оборудования. Сформулирована возможность решения поставленной задачи в среде программирования Matlab.

На основе стандартной функции *fmincon* в среде Matlab разработана программа, позволяющая по заданным теплофизическим характеристикам материала (коэффициентам теплопроводности, температуропроводности), параметрам конвективно-радиационного теплообмена (коэффициентам конвективной теплоотдачи и приведенным степеням черноты) и параметрам температурно-временного режима в печи отжигать идентифицировать часть энергии радиационного теплообмена, попадающей с поверхности печи на изделие в каждой из зон.

Приведен пример идентификации параметров радиационного теплообмена в печи отжига листового прокатного стекла на основе программы моделирования температурного поля в среде Matlab. Рассмотрены особенности разработки программы, связанные с необходимостью учета изменяющихся начальных и граничных условий на каждом из этапов температурно-временного режима отжиг изделия с помощью функций *pdebeg* и *pdebound* стандартной функции *pdepe* Matlab. Приведены программные коды функций, основной программы и результаты расчета температур поверхности ленты и степеней черноты поверхности печи.

Произведен анализ результатов работы программы, и продемонстрировано хорошее совпадение полученных степеней черноты с их физически обоснованными значениями при радиационном теплообмене в печах отжига стеклоизделий.

Показана перспективность использования стандартных функций Matlab для решения задач оптимизации режимов термообработки изделий в различных технологических процессах.

Ключевые слова: идентификация условий теплообмена, изделие плоской формы, конвективно-радиационный теплообмен, степень черноты, начальные и граничные условия, моделирование, температурное поле, температурно-временной режим, оптимизация режимов термообработки.

Определение параметров конвективно-радиационного теплообмена играет важнейшую роль в большинстве технологических процессов, связанных с термообработкой изделий [1]. Например, при описании процесса отжига листового стекла после создания математической модели температурного поля [2–6] возникает необходимость проверки совпадения результатов расчетов с экспериментально измеренными температурами характерных точек изделия (для ленты это обычно температура верхней поверхности).

Для решения этой задачи необходимо идентифицировать параметры конвективного (коэффициенты теплоотдачи для нижней и верхней поверхностей изделия α_1, α_2 (Вт/(м²град))) и (или) радиационного (степени черноты нижней и верхней ограждающих поверхностей технологического оборудования $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$) теплообмена. Выбор определяемых параметров зависит от типа оборудования в соответствии с преобладающими механизмами внешнего теплопереноса. Различают конвективные, радиационные и конвективно-радиационные печи [7]. В данной работе приведен пример идентификации параметров радиационного теплообмена в печи отжига листового прокатного стекла на стеклозаводе «Красный май» (Тверская обл.) на основе программы моделирования температурного поля в среде Matlab, описанной в [6].

Для моделирования температурного поля используется стандартная функция *pdepe* Matlab [8, 9]. Функция типа дифференциального уравнения *pdedif* в силу исследования той же геометрической формы останется неизменной [6], тогда как функции начальных *pdebeg* и граничных условий *pdebound* изменятся следующим образом:

```
function [c,f,s]=pdedif(x,tau,t,dtdx)
global a
c = 1/a;
f = dtdx;
s = 0;

function t0=pdebeg(xv)
global tbeg x
[xm,num]=min(abs(xv-x));
t0=tbeg(num);% tbeg;

function [pl,ql,pr,qr]=pdebound(xl,tl,xr,tr,tau)
global alfa1 alfa2 es1 es2 sig Kel lambda a1 a2 a3 a4 b1
b2 b3 b4 rs1 rs2
tc1=a1+b1*tau;
tc2=a2+b2*tau;
tm1=a3+b3*tau;
tm2=a4+b4*tau;
pl = alfa1/lambda*(tc1-tl)+es1*sig/lambda*(rs1*(tm1+
+Kel)^4-(tl+Kel)^4);
ql = 1;
pr = -alfa2/lambda*(tc2-tr)-es2*sig/lambda*(rs2*(tm2+
+Kel)^4-(tr+Kel)^4);
qr = 1;
```

Это связано с необходимостью учета изменяющихся начальных и граничных условий на каждом из этапов температурно-временного режима отжига изделия при его перемещении в следующую зону печи отжига. В приведенных выше функциях a_1, a_2, a_3, a_4 (°C) и b_1, b_2, b_3, b_4 (°C/мин.) – начальные температуры и скорости изменения температур среды и печи соответственно под и над лентой для каждой из зон отжига.

Вспомогательной при идентификации условий теплообмена является приведенная далее функция *Iden*, определяющая отклонение рассчитанной по модели температуры верхней поверхности ленты от экспериментально полученной *tl_iden*:

```
function y=Iden(par,m,tau)
global l a1 b1 a2 b2 a es1 es2 sig Kel lambd alfa1 alfa2
a3 b3 a4 b4 tbeg x tl_iden t rs1 rs2
alfa1=par(1); alfa2=par(2); rs1=par(3); rs2=par(4);
options=odeset('RelTol',1e-4);
sol = pdepe(m,@pdedif,@pdebeg,@pdebound,x,tau,
options);
t = sol(:, :, 1);
tfin=t(end, :);
y=abs(tfin(end)-tl_iden);
```

Исходные данные для решения задачи идентификации, описывающие условия в цехе отжига листового прокатного стекла, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные по зонам печи отжига

Table 1

Initial data by annealing furnace zones

Зона от- жига	Коор- дината печи, м	Темпера- тура среды $a_1= a_2$, °C	Темпера- тура печи $a_3= a_4$, °C	Температура поверхности tl_iden , °C
1	1,8	479	540	477
2	3,6	510	560	496
3	5,7	518	560	513
4	7,5	537	550	531
5	10,5	539	550	532
6	13,5	541	550	533
7	15,9	532	540	526
8	18,2	507	530	500
9	20,7	480	530	473
10	24,3	453	520	446
11	26,2	439	439	430
12	29,9	423	423	413
13	31,6	388	388	371
14	36,4	366	366	352
15	38,8	346	346	329
16	43,3	325	325	306
17	48,4	301	301	284
18	50,8	285	285	260

Скорость движения изделия в печи составляет $V=1,2$ (м/мин.), поэтому по данным таблицы можно рассчитать время нахождения в зоне отжига и скорости изменения температур среды и печи на каждом этапе температурно-временного режима. Для упрощения расчетов рассмотрена симметричная задача конвективно-радиационного теплообмена,

то есть $\alpha_1=\alpha_2$ и $\epsilon_{s1}=\epsilon_{s2}$. Данные таблицы 1 в среде Matlab удобно читать из файла Excel. При расчете использованы следующие значения параметров: $a=0,25386$ см²/мин.; $\lambda=0,008856$ Вт/см×град.; $N=6$; $l=0,6$ см; $\epsilon_{s1}=\epsilon_{s2}=0,85$; $\alpha_1=\alpha_2=0,001506$ Вт/см²×град.; $t_0(r)=444,0; 457,7; 468,0; 474,0; 475,1; 471,1; 461,7$ °C.

Для идентификации параметров теплообмена в среде Matlab необходимо использовать функцию *fmincon*, позволяющую эффективно решать задачи нелинейной оптимизации функции нескольких переменных с ограничениями типа неравенств и равенств. Приведем текст основной программы с использованием функции *fmincon*:

```
clear
close all
clc
global l a1 b1 a2 b2 a es1 es2 sig Kel lambd alfa1 alfa2
a3 b3 a4 b4 tbeg x tl_iden t rs1 rs2
TTR = xlsread('TBP непуод отжига');
Nzones=size(TTR,2)
y1st=TTR(3,:); y2st=y1st; y3st=TTR(7,:);
y4st=y3st;% среда и нагреватели слева, справа
tl_exp=TTR(1,:);
coord=TTR(9,:); L=coord(Nzones); % координаты и
длина (м)
tau_finish=TTR(10,Nzones); V=L/tau_finish % время
(мин); скорость ленты (м/мин)
tau_end=coord/V; % текущее время конца этапа
TBP (мин)
tau_zone(1)=tau_end(1); Vyst1(1)=0; Vyst2(1)=0;
Vyst3(1)=0; Vyst4(1)=0;
for i=2:Nzones
tau_zone(i)=tau_end(i)-tau_end(i-1); % длительно-
сти этапов TBP (мин)
Vyst1(i)=(y1st(i)-y1st(i-1))/tau_zone(i);
Vyst2(i)=(y2st(i)-y2st(i-1))/tau_zone(i);
Vyst3(i)=(y3st(i)-y3st(i-1))/tau_zone(i);
Vyst4(i)=(y4st(i)-y4st(i-1))/tau_zone(i);
% скорости изменения температур среды и
нагревателей на этапах (град/мин)
end;
m = 0; sig=5.67e-12; Kel=273.15; es2=0.85; es1=es2;
rs1=0.8; rs2=rs1;
alfa2=0.001506; alfa1=alfa2; a=0.6*0.4231;
lambd=0.008856;
l=0.6; N=7; x = linspace(0,l,N); Ntau=20;
N1=round(N/2);
tbeg=TTR(14,1:N);
par_prev=[alfa1; alfa2; rs1; rs2]; TolX=0.001;
A=[]; b=[]; nonlcon=[]; optset=[];
lb=[0.0015; 0.0015; 0.05; 0.05]; ub=[0.001506;
0.001506; 0.95; 0.95];
Aeq=[0 0 1 -1]; beq=[0]; par_all=[];
for i=1:Nzones
tau_fin=tau_zone(i);
tau = linspace(0,tau_fin,Ntau);
if i==1
a1=y1st1(i); a2=y2st2(i); a3=y3st3(i); a4=y4st4(i);
else
a1=y1st1(i-1); a2=y2st2(i-1); a3=y3st3(i-1);
a4=y4st4(i-1);
end;
b1=Vyst1(i);b2=Vyst2(i); b3=Vyst3(i);b4=Vyst4(i);
```

```

par0=par_prev; tL_iden=tL_exp(i);
optset=optimset('Display','iter','TolX','TolY');
[par,fval]=fmincon(@Iden,par0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,optset,m,tau);
par_all=[par_all; par'];
% options=odeset('RelTol',1e-4);
% sol = pdepe(m,@pdedif,@pdebeg,@pdebound,
x,tau,options);
% t = sol(:,:,1)
t1=[t(:,1) t(:,N1) t(:,N)]
if i==1
surf(x,tau,t)
title('Температурное поле в период отжига')
xlabel('Координата x, см')
ylabel('Время \tau, мин')
grid on
hold on
else
figure(1)
surf(x,tau+tau_end(i-1),t)
end;
tbeg=t(end,:);
par_prev=par;
figure(2)
plot(x,t(end,:), 'r')
title(strcat('Решение n-го \tau =',
num2str(tau_end(i)), '(мин)'))
xlabel('Координата x, см')
ylabel('t(x, \tau)')
grid on
hold on
end;
    
```

Рассчитанное температурное распределение приведено на рисунке, а идентифицированные значения параметров теплообмена и температур поверхности пластины – в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что отклонения рассчитанных температур верхней поверхности пластины от ее экспериментальных значений составляют десятые доли градуса, за исключением первой зоны,

что можно объяснить неравномерностью условий теплообмена на входе в печь отжига. Полученные степени черноты r_{s2} представляют часть энергии радиационного теплообмена, попадающей с поверхности печи на изделие в каждой из зон. Их значения в диапазоне от 0,5 до 0,95 хорошо согласуются с физическими представлениями о радиационном теплообмене в печах отжига стеклоизделий.

Таблица 2

Результаты идентификации условий теплообмена

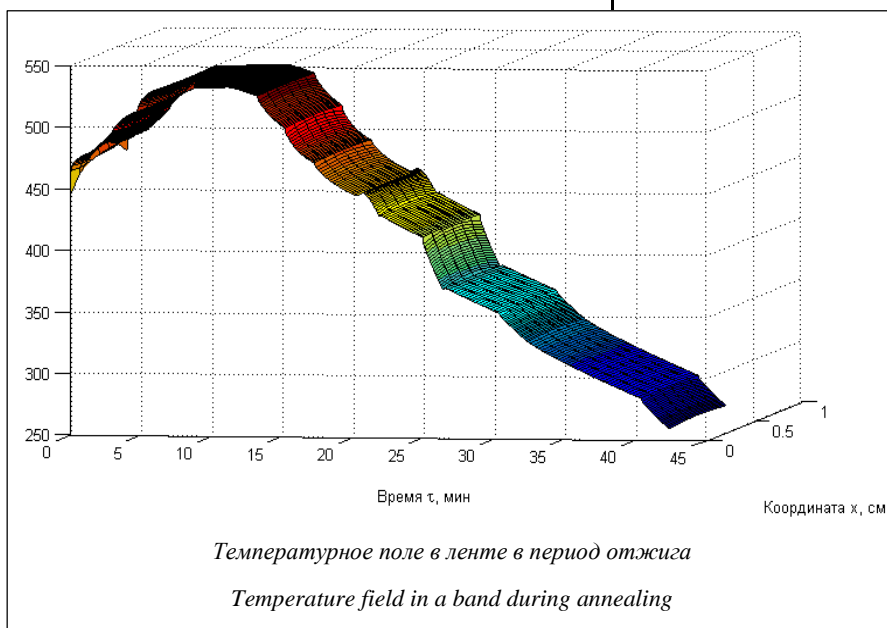
Table 2

Heat-exchange condition identification results

Зона отжига	Экспериментальная температура tL_iden , °C	Рассчитанная температура $tfin(end)$, °C	Степень черноты поверхности печи r_{s2}
1	477	479,2	0,7394
2	496	496,4	0,7722
3	513	512,8	0,8083
4	531	530,9	0,9207
5	532	531,8	0,9106
6	533	533,0	0,9153
7	526	526,0	0,9075
8	500	500,2	0,8101
9	473	472,5	0,7080
10	446	446,0	0,6423
11	430	430,0	0,7528
12	413	413,0	0,8820
13	371	371,0	0,5973
14	352	351,9	0,8225
15	329	329,0	0,7119
16	306	306,0	0,7414
17	284	284,1	0,7389
18	260	259,8	0,5361

Представленные результаты идентификации условий конвективно-радиационного теплообмена с окружающей средой и ограждающими поверхностями можно использовать для оптимизации режимов термообработки изделий плоской формы с целью сокращения длительности технологического процесса или энергетических затрат на него [10].

Наличие в Matlab наряду с *pdepe* функции *fmincon*, решающей задачи оптимизации функции нескольких переменных с ограничениями, позволяет эффективно использовать ее для оптимизации режима отжига стеклоизделий плоской формы.



Литература

1. Рубанов В.Г. Автоматизация и управление объектами промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 1996. № 2. С. 180–19.
2. Михеев М.А., Михеева М.И. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
3. Мазурин О.В., Лалыкин Н.В. Математическая модель процесса отжига листового стекла // Стекло и керамика. 1984. № 1. С. 13–15.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности: учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1967. 599 с.
5. Gardon R. Calculation of temperature distributions in glass

plates undergoing heat-treatment. J. Amer. Ceram. Soc., 1958, vol. 41, no. 6, pp. 200–209.

6. Марголис Б.И. Программы моделирования температурных полей в изделиях плоской формы // Программные продукты и системы. 2016. № 2. С. 124–127.
7. Мазурин О.В., Белоусов Ю.Л. Отжиг и закалка стекла: учеб. пособие. М.: Изд-во МИСИ и БТИСМ, 1984. 114 с.
8. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учеб. курс. СПб: Питер, 2005. 512 с.
9. Дьяконов В.П. MATLAB 7.*/ R2006/ R2007: самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.
10. Марголис Б.И. Нахождение оптимального режима отжига стеклоизделий, обеспечивающего минимальные энергозатраты // Стекло и керамика. 2003. № 5. С. 12–13.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.117.148-151

Received 02.12.16
2017, vol. 30, no. 1, pp. 148–151

PROGRAM FOR HEAT CONDITIONS IDENTIFICATION IN FLAT PRODUCTS

B.I. Margolis¹, Dr.Sc. (Engineering), Head of Chair, borismargolis@yandex.ru

¹ Tver State Technical University, Nikitin Quay 22, Tver, 170026, Russian Federation

Abstract. The article considers the problem statement on identification of heat transfer conditions for flat products with asymmetrical shapes convective-radiative heat transfer surfaces to the environment and enclosing surfaces (heating elements) of the process equipment. The paper formulates a possible solution of the problem in Matlab.

The program, which has been developed based on the standard *fmincon* function in MatLab, allows identifying the part of radiation heat transfer energy, which gets from a furnace surface to the product in each zone. For this purpose it uses predetermined thermo-physical characteristics of the material (thermal conductivity, thermal diffusivity), the parameters of convective-radiative heat transfer (coefficients of convective heat transfer and an emissivity factor) and the temperature and time parameters on an annealing furnace.

The paper presents an example of radiative heat transfer parameter identification in an annealing furnace for rolled glass sheet on the basis of the temperature field simulation program in Matlab. The authors consider the features of program development related to the need to take into account changing initial and boundary conditions at each stage of the temperature-time mode of an annealing product using *pdebeg* and *pdebound* of the standard functions *pdepe* in MatLab. There are software codes of functions and main program, as well as the results of calculating band surface temperatures and emissivity factors of a furnace surface.

There is the analysis of the results of the program. The paper demonstrates good agreement between the obtained emissivity factors and their physically reasonable values for radiative heat transfer in glass annealing furnaces. The paper shows the prospects of using standard Matlab functions to solve product heat treatment mode optimization problems in various technological processes.

Keywords: heat transfer conditions identification, flat shape product, convective-radiant heat transfer, emissivity factor, initial and boundary conditions, simulation, temperature field, temperature-time mode, heat treatment optimization.

References

1. Rubanov V.G. Automation and management of industry facilities of construction materials. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials]. 1996, no. 2, pp. 18–19 (in Russ.).
2. Mikheev M.A., Mikheeva M.I. *Osnovy teploperedachi* [Heat-Transfer Principles]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 344 p.
3. Mazurin O.V., Lalykin N.V. A mathematical model of a flat glass annealing process. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, vol. 41, iss. 1, pp. 9–13 (in Russ.).
4. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Thermal Conductivity Theory]. Study guide, Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 599 p.
5. Gardon R. Calculation of temperature distributions in glass plates undergoing heat-treatment. *Jour. Amer. Ceram. Soc.* 1958, vol. 41, no. 6, pp. 200–209.
6. Margolis B.I. Simulator programs for temperature fields in flat form products. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2016, no. 2, pp. 124–127 (in Russ.).
7. Mazurin O.V., Belousov Yu.L. *Otzhig i zakalka stekla* [Glass Flashing and Toughening]. Study guide, Moscow, MISI i BTISM Publ., 1984, 114 p.
8. Lazarev Yu. *Modelirovanie protsessov i sistem v MATLAB* [Modeling processes and systems in MATLAB]. Training course, St. Petersburg, Piter Publ., 2005, 512 p.
9. Dyakonov V.P. *MATLAB 7.*/R2006/R2007: samouchitel* [MATLAB 7.*/R2006/R2007: Teach Yourself]. Moscow, DМК Press, 2008, 768 p.
10. Margolis B.I. An Optimum Regime for Glass Annealing with Minimum Energy Consumption. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2003, vol. 60, iss. 5, pp. 12–13 (in Russ.).