

**ПРОГРЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ЛУЧИСТО-
КОНВЕКТИВНЫМ ТЕПЛОМ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОСТИ
ТЕРМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ И ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА
СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ**

В. В. САЛОМАТОВ, А. А. ТОРЛОПОВ

(Представлена кафедрой котлостроения и котельных установок)

Исследование процессов нестационарной теплопроводности в твердых телах, подверженных внезапному нагреву от источников с высокой температурой, является актуальной проблемой [1, 2, 3] в связи с важными приложениями теории этих процессов в практике нагрева металла. Характерная особенность внутреннего теплопереноса в стальном слитке заключается в том, что протекание этого процесса сопровождается изменением физико-химической природы материала. Кроме того, термические коэффициенты стальных изделий меняются от температуры настолько значительно, что существенным образом влияют на характер процесса.

Для наиболее правильного отражения кинетики переноса тепла в твердых телах математическая модель исследуемого явления должна учитывать указанные факторы. Однако в такой строгой постановке рассматриваемая задача сводится к решению дважды нелинейных дифференциальных уравнений, точное решение которых в настоящее время не найдено. Математические трудности, встречающиеся на пути получения аналитических зависимостей, естественно, заставляют исследователей вводить некоторые условные приемы линеаризации, наиболее распространенными из которых можно назвать следующие:

- а) замена истинных законов изменения теплопроводности и теплоемкости их среднеинтегральными значениями;
- б) пренебрежение тепловым эффектом фазовых превращений;
- в) замена передачи тепла излучением законами конвективного теплообмена.

Подобные упрощения приводят к получению лишь приближенных решений, охватывающих узкую область практического приложения в металлургической теплотехнике [4, 5, 6].

Настоящее исследование проводится с целью определения нестационарного распределения температур в металлических изделиях в форме пластины и цилиндра, имеющих постоянную начальную температуру. При этом результирующий тепловой поток, проходящий через поверхность нагреваемого тела, формируется за счет теплообмена с внешней средой постоянной температуры по законам излучения и конвекции. Учитывается характер изменения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости от температуры и явление структурных превращений.

Уравнение нестационарного распределения температур в этом случае имеет вид

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right] + \frac{\kappa}{\xi} \cdot \lambda(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \xi}, \quad (1)$$

где коэффициент κ в плоской и цилиндрической системе координат соответственно равен 0 и 1.

Требуется отыскать решение этого уравнения с учетом начальных и граничных условий

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0 = \text{const}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta(0, Fo)}{\partial \xi} = 0, \quad (3)$$

$$\lambda(\theta) \frac{\partial \theta(1, Fo)}{\partial \xi} = S_\kappa \left\{ [1 - \theta^4(1, Fo)] + \frac{Bi}{S_\kappa} [1 - \theta(1, Fo)] \right\}. \quad (4)$$

Вследствие нелинейности уравнений (1) и (4) пока не удастся получить аналитического решения системы (1) ÷ (4). Поэтому данная система решалась численным методом с помощью электронной вычислительной машины „Минск-1“ по следующим соотношениям:

1) для относительной температуры поверхности

$$\begin{aligned} \theta_{\text{пов},j+1} = \theta_{\text{пов},j} + 2 \frac{\Delta Fo}{h^2} \cdot \frac{\lambda(\theta_{\text{пов},j})}{c(\theta_{\text{пов},j})} \left[p \cdot \frac{\partial \theta_{\text{пов},j}}{\partial \xi} + \frac{h^2}{2\lambda(\theta_{\text{пов},j})} + \right. \\ \left. + \frac{\partial \lambda(\theta_{\text{пов},j})}{\partial \theta_{\text{пов},j}} \cdot \left(\frac{\partial \theta_{\text{пов},j}}{\partial \xi} \right)^2 + (\theta_{1,j} - \theta_{\text{пов},j}) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где параметр p для пластины и цилиндра соответственно равен h и $h \left(1 + \frac{1}{2} h \right)$,

$$\frac{\partial \theta_{\text{пов},j}}{\partial \xi} = \frac{S_\kappa}{\lambda(\theta_{\text{пов},j})} \cdot \left[(1 - \theta_{\text{пов},j}^4) + \frac{Bi}{S_\kappa} (1 - \theta_{\text{пов},j}) \right],$$

2) для относительной температуры во внутренних узлах сетки

$$\begin{aligned} \theta_{i,j+1} = \theta_{i,j} + \frac{\Delta Fo}{h^2} \cdot \frac{1}{c(\theta_{i,j})} \left[\lambda(\theta_{i,j}) (b\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + l\theta_{i-1,j}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial \lambda(\theta_{i,j})}{\partial \theta_{i,j}} \cdot (\theta_{i+1,j}^2 - 2\theta_{i+1,j} \cdot \theta_{i-1,j} + \theta_{i-1,j}^2) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $b = l = 1$ для пластины и $b = 1 + \frac{h}{2\xi_i}$, $l = 1 - \frac{h}{2\xi_i}$ для цилиндра;

3) для относительной температуры на оси симметрии

$$\theta_{\text{цен},j+1} = \frac{\theta_{\text{цен},j} + m \cdot \frac{\Delta Fo}{h^2} \cdot \frac{\lambda(\theta_{\text{цен},j})}{c(\theta_{\text{цен},j})} \theta_{N-1,j+1}}{1 + m \frac{\Delta Fo}{h^2} \cdot \frac{\lambda(\theta_{\text{цен},j})}{c(\theta_{\text{цен},j})}}, \quad (7)$$

где коэффициент m соответственно для пластины и цилиндра принимает значение 2 и 4.

В основу принятых законов изменения $\lambda(T)$ и $c(T)$ были положены экспериментальные данные [7, 8, 9, 10], обработанные А. В. Ка-

вадеровым и Ю. А. Самойловичем [11]. Однако принятый авторами работы [11] температурный интервал структурных превращений углеродистых сталей оказался несколько завышенным, что не давало удовлетворительного соответствия данных расчета с экспериментальными результатами. Анализируя возможные температурные интервалы фазовых превращений по данным опытных исследований нагрева изделий из различных марок сталей [6, 12, 13], необходимо принять его в пределах 80° К.

С учетом проведенного анализа температурная зависимость λ и c запишется в виде:

а) для углеродистых сталей в интервале температур от 273° К до 998° К

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda_0} = 1 - 0,6 \cdot 10^{-3} (T - 273),$$

$$\frac{c(T)}{c_0} = 1 + 0,5 \cdot 10^{-3} (T - 273);$$

в интервале структурных превращений (998 ÷ 1078° К)

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda_0} = 0,58, \quad \frac{c(T)}{c_{998}} = 1 + 0,048 (T - 998);$$

за пределами структурных превращений

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda_0} = 0,58, \quad \frac{c(T)}{c_0} = 1,4;$$

б) для сталей аустенитного типа в интервале температур от 273° К до 973° К

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda_0} = 1 + 0,9 \cdot 10^{-3} (T - 273),$$

$$\frac{c(T)}{c_0} = 1 + 0,5 \cdot 10^{-3} (T - 273)$$

и при $T > 973^\circ \text{ К}$

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda_0} = 1,63, \quad \frac{c(T)}{c_0} = 1,35.$$

Из условия устойчивости численной схемы величина $\frac{\Delta F_0}{h^2}$ принималась во всех случаях равной $\frac{1}{4}$, за исключением расчета нагрева пластины из стали аустенитного типа, для которой отношение $\frac{\Delta F_0}{h^2}$ было принято равным $\frac{1}{5}$. Проверка погрешности принятой численной схемы произведена по методу Рунге [14]. Погрешность расчетов не превышает 1% в начальной стадии нагрева и составляет десятые и сотые доли процента за ее пределами.

Для получения численных результатов изменение режимных параметров нагрева принималось в интервале значений, встречающихся в производственной практике,

$Sk = 0,25 \div 4$, $Bi/Sk = 0 \div 2$, $T_0 = 293 \div 873^\circ \text{ К}$, $T_c = 1273 \div 1773^\circ \text{ К}$.

Часть полученного числового материала приведена в приложениях 1 и 2, а также в виде номограмм на рис. 4, 5, 6, 7.

Приложение 1

Значения безразмерной температуры $\Theta : 10^4$ поверхности и центра неограниченного цилиндра при одновременном нагреве радиацией и конвекцией с учетом температурной зависимости λ и c (данные расчета на ЭВМ)

а) углеродистые стали

$T_0=293^\circ\text{K}$					$T_0=873^\circ\text{K}$			
Bi/Sk	0		0,5		0		0,5	
F_0	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.

$T_c=1273^\circ\text{K}$					$Sk=0,5$			
0,05	2302	3547	2302	3948	6858	7774	6858	7904
0,25	2714	5085	2817	5755	6926	8381	6933	8531
0,4	3250	5802	3449	6499	7080	8613	7098	8735
0,6	3969	6543	4256	7201	7316	8821	7346	8930
1,0	5216	7646	5571	8121	7734	9014	7772	9142
1,5	6404	8344	6720	8751	8010	9252	8037	9336
2,0	7231	8840	7500	9029	8172	9385	8206	9464
2,5	7788	9060	7936	9277	8325	9476	8371	9549
3,0	8036	9271	8126	9410	8643	9560	8799	9630
3,5	8196	9402	8288	9505	9022	9663	9136	9728
4,0	8350	9491	8545	9588	9279	9753	9373	9804
4,5	8720	9574	8990	9683	9468	9819	9544	9853
5,0	9068	9679	9268	9771	9608	9867	9669	9898
5,5	9313	9765	9469	9834	9710	9902	9759	9926
6,0	9494	9828	9614	9880	9786	9929	9824	9944

$T_c=1273^\circ\text{K}$					$Sk=2$			
0,05	2304	6662	2305	7251	6858	9017	6858	9146
0,1	2399	7797	2414	8242	6860	9223	6860	9306
0,25	3301	8800	3369	8978	6988	9508	6995	9566
0,4	4263	9108	4344	9230	7229	9610	7242	9660
0,6	5293	9342	5372	9430	7558	9695	7574	9731
0,8	6082	9477	6155	9542	7831	9735	7845	9765
1,0	6692	9547	6755	9602	7979	9764	7988	9796
1,5	7709	9725	7757	9759	8222	9825	8233	9846
2,0	8094	9803	8115	9828	8502	9864	8573	9881
2,5	8323	9846	8348	9866	9098	9905	9129	9918
3,0	8836	9881	8904	9899	9420	9939	9443	9948
3,5	9258	9922	9303	9934	9626	9961	9643	9966
4,0	9522	9950	9554	9958	9758	9975	9770	9978

Продолжение приложения 1

$T^{\circ}=293^{\circ}\text{K}$					$T^{\circ}=873^{\circ}\text{K}$			
Bi/Sk	0		0,5		0		0,5	
	цен.	пов.	цен.	ов.	цен.	пов.	цен.	пов.

$T_c=1773^{\circ}\text{K}$					$S_k=0,5$			
0,05	1653	2907	1653	3349	4924	5944	4924	6064
0,25	2048	4529	2148	5312	4998	7067	5078	7373
0,4	2555	5320	2744	6022	5163	7480	5192	7796
0,6	3230	5999	3487	6862	5432	7867	5486	8153
1,0	4365	7146	4668	7693	5804	8352	5862	8602
1,5	5394	7952	5663	8394	6515	8724	6784	8931
2,0	5883	8463	6083	8783	7422	9047	7656	9224
2,5	6774	8803	7261	9035	8077	9367	8287	9444
3,0	7599	9118	7996	9344	8572	9496	8751	962
3,5	8210	9359	8538	9530	8943	9632	9092	9714
4,0	8672	9533	8936	9663	9219	9732	9341	9794
4,5	9018	9660	9227	9757	9424	9804	9521	9851
5,0	9275	9751	9439	9825	9575	9856	9652	9892
5,5	9465	9818	9592	9873	9686	9894	9747	9922
6,0	9605	9866	9704	9908	9768	9922	9818	9943

$T_c=1773^{\circ}\text{K}$					$S_k=2$			
0,05	1655	5950	1655	7008	4924	8073	4924	8367
0,1	1740	7546	1752	7969	4927	8699	4927	8874
0,25	2534	8618	2595	8845	5082	9203	5092	9312
0,4	3401	8981	3478	9142	5387	9382	5406	9462
0,6	4361	9241	4442	9351	5739	9510	5755	9573
0,8	5089	9377	5170	9470	5954	9590	5981	9642
1,0	5644	9498	5687	9565	6584	9645	6660	9690
1,5	6692	9654	6825	9702	7835	9767	7893	9798
2,0	7897	9774	7983	9808	8606	9852	8654	9872
2,5	8646	9856	8715	9878	9101	9905	9139	9919
3,0	9128	9908	9178	9922	9422	9939	9449	9948
3,5	9438	9941	9473	9952	9628	9961	9646	9967
4,0	9638	9962	9662	9968	9759	9975	9773	9979

б) стали аустенитного типа

$T_c=1273^{\circ}\text{K}$					$S_k=0,5$			
0,1	2338	3909	2352	4355	6889	7687	6894	7809
0,2	2604	4494	2702	5023	7053	7957	7084	8098
0,3	3000	4926	3207	5495	7266	8151	7324	8301

Продолжение приложения I

$T_0=293^\circ\text{K}$					$T_0=873^\circ\text{K}$			
Bl/Sk	0		0,5		0		0,5	
	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.
0,4	3431	5296	3735	5889	7480	8317	7561	8471
0,8	5053	6549	5588	7158	8220	8850	8352	9001
1,2	6371	7522	6955	8070	8767	9222	8907	9351
1,6	7392	8260	7927	8723	9158	9477	9284	9580
2,0	8157	8806	8613	9167	9430	9650	9534	9729
2,4	8722	9191	9085	9460	9616	9766	9697	9825
2,8	9126	9456	9402	9652	9742	9843	9802	9886
3,2	9408	9636	9611	9775	9824	9894	—	—

$T_c=1273^\circ\text{K}$					$S_k=2$			
0,02	2302	5022	2302	5614	6858	8177	6858	8332
0,04	2302	5860	2302	6450	6859	8513	6859	8663
0,08	2366	6787	2384	7301	6906	8850	6912	8980
0,12	2598	7321	2665	7736	7035	9032	7053	9146
0,2	3414	7921	3587	8289	7398	9240	7438	9333
0,3	4559	8387	4803	8661	7848	9399	7904	9476
0,4	5563	8713	5823	8932	8234	9516	8296	9580
0,56	6800	9096	7044	9258	8720	9659	8782	9707
0,8	8027	9461	8218	9565	9215	9794	9268	9827
0,96	8571	9617	8728	9694	9434	9853	9480	9877
1,2	9123	9769	9236	9819	9654	9910	9688	9927
1,36	9368	9835	9456	9872	9750	9936	9778	9948

$T_c=1773^\circ\text{K}$					$S_k=0,5$			
0,1	1690	3237	1706	3710	4963	6000	4974	6224
0,2	1960	3807	2072	4374	5179	6396	5236	6670
0,3	2362	4231	2596	4847	5465	6697	5573	6997
0,4	2796	4597	3140	5247	5759	6960	5914	7277
0,8	4421	5864	5027	6608	6854	7849	7129	8176
1,2	5753	6963	6465	7684	7740	8510	8042	8799
1,6	6832	7848	7537	8460	8416	8985	8693	9218
2,0	7739	8510	8337	8991	8909	9315	9140	9494
2,4	8415	8984	8897	9345	9257	9540	9439	9673
2,8	8908	9314	9277	9576	9498	9692	9635	9789
3,2	9257	9540	9529	9728	9662	9794	9763	9864
3,6	9498	9692	9694	9824	9773	9862	—	—

Продолжение приложения 1

$T_0=293^\circ\text{K}$					$T_0=873^\circ\text{K}$			
Bi/Sk	0		0,5		0		0,5	
	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.
$T_c=1773^\circ\text{K}$					$S_k=2$			
0,02	1652	4334	1652	4976	4924	6728	4924	7038
0,04	1653	5166	1654	5770	4925	7295	4926	7613
0,08	1720	6114	1743	6780	4991	7906	5004	8188
0,12	1966	6750	2050	7345	5178	8250	5216	8495
0,2	2844	7520	3064	7982	5721	8646	5805	8840
0,3	4067	8090	4364	8442	6430	8943	6546	9097
0,4	5114	8485	5421	8767	7053	9155	7182	9282
0,56	6401	8950	6693	9153	7851	9408	7979	9503
0,8	7755	9380	7992	9506	8675	9646	8781	9707
0,96	8372	9560	8566	9653	9043	9718	9132	9793
1,2	9000	9736	9138	9794	9414	9847	9479	9877
1,36	9278	9811	9386	9855	9578	9890	9629	9913
1,6	9558	9885	9632	9914	9742	9933	9777	9948

Приложение 2

Значения безразмерной температуры $\Theta : 10^4$ поверхности и центра неограниченного цилиндра при одновременном нагреве радиацией и конвекцией с учетом температурной зависимости λ и c (данные расчета на ЭВМ)

а) углеродистые стали

$T_0=2933^\circ\text{K}$					$T_0=873^\circ\text{K}$			
Bi/Sk	0		0,5		0		0,5	
	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.
$T_c=1273^\circ\text{K}$					Sk=0,5			
0,05	2305	3687	2306	4126	6858	7842	6858	7961
0,25	3309	5802	3528	6522	7065	8532	7084	8684
0,4	4316	6871	4656	7542	7395	8772	7430	8912
0,6	5488	7877	5880	8242	7768	9019	7809	9135
0,8	6425	8327	6774	8772	7964	9228	7995	9355
1,0	7118	8793	7417	9015	8086	9359	8122	9461
1,3	7803	9052	7938	9303	8262	9525	8324	9607
1,6	8050	9333	8139	9480	8778	9649	8978	9721
1,9	8226	9499	8349	9619	9237	9760	9358	9817
2,1	8369	9584	8840	9695	9424	9819	9522	9864
2,4	9036	9704	9237	9797	9620	9831	9692	9912
2,7	9374	9803	9542	9870	9750	9922	9812	9950
$T_c=1273^\circ\text{K}$					Sk=2			
0,025	2302	5751	2302	6408	6858	8162	6858	8829
0,05	2314	7032	2318	7605	6858	9093	6858	9208
0,125	2894	8420	2960	8822	6898	9345	6902	9476
0,25	4442	9170	4549	9283	7218	9593	7233	9647
0,4	5858	9464	5954	9549	7664	9717	7684	9753
0,6	7072	9619	7151	9722	7973	9804	8004	9832
0,8	7841	9770	7855	9802	8183	9860	8197	9878
1,0	8062	9828	8038	9855	8403	9894	8443	9909
1,2	8247	9871	8280	9890	9080	9923	9127	9935
1,4	8683	9905	8815	9920	9403	9948	9435	9956
1,6	9212	9932	9270	9944	9605	9965	9628	9971
1,8	9483	9955	9522	9963	9738	9977	9755	9981
2,0	9657	9970	9708	9979	9822	9984	—	—
$T_c=1773^\circ\text{K}$					Sk=0,5			
0,05	1656	3049	1657	3732	4924	5986	4924	6179
0,25	2601	5268	2805	5969	5140	7313	5166	7677
0,4	3025	6240	3818	6878	5479	7886	5533	8212

Продолжение приложения 2

Bl/Sk	$T_0=293^\circ\text{K}$				$T_0=873^\circ\text{K}$			
	0		0,5		0		0,5	
	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.
0,6	4545	7207	4853	7798	5778	8414	5826	8684
0,8	5303	7882	5593	8386	6098	8775	6618	9004
1,0	5745	8368	5900	8789	7234	9058	7525	9251
1,3	6699	8893	7351	9200	8152	9382	8391	9522
1,6	7829	9266	8282	9488	8765	9598	8955	9696
1,9	8546	9522	8884	9674	9180	9738	9324	9803
2,1	8891	9641	9165	9759	9377	9803	9495	9856
2,4	9264	9766	9461	9846	9589	9871	9674	9908
2,7	9514	9847	9652	9901	9728	9915	9790	9940

 $T_c=1773^\circ\text{K}$ $S_k=2$

0,025	1652	4998	1652	5559	4924	7688	4924	8044
0,05	1664	6375	1667	7390	4924	8246	4924	8542
0,125	2171	8133	2225	8560	4970	9020	4976	9171
0,25	3512	9010	3605	9187	5346	9395	5370	9483
0,4	4784	9374	4876	9470	5756	9589	5773	9647
0,6	5754	9606	5795	9665	6873	9731	6963	9769
0,8	6839	9732	7028	9774	7980	9820	8048	9846
1,0	7967	9819	8085	9849	8664	9881	8717	9899
1,2	8656	9880	8742	9901	9113	9922	9155	9934
1,4	9109	9921	9171	9935	9412	9948	9443	9956
1,6	9408	9948	9453	9957	9609	9966	9632	9971
1,8	9607	9965	9639	9972	9740	9977	9757	9981

б) стали аустенитного типа

 $T_c=1273^\circ\text{K}$ $S_k=0,5$

0,1	2434	4172	2482	4670	6961	7829	6979	7965
0,2	3122	5034	3386	5637	7362	8234	7436	8394
0,3	3986	5747	4424	6394	7781	8552	7896	8717
0,4	4804	6376	5360	7029	8152	8818	8292	8977
0,5	5547	6933	6166	7566	8472	9034	8623	9186
0,6	6212	7427	6849	8025	8744	9219	8897	9358
0,8	7315	8223	7906	8730	9164	9491	9302	9600
1,0	8137	8808	8638	9199	9453	9670	9563	9752
1,2	8738	9215	9132	9500	9644	9787	9728	9847
1,4	9162	9488	9454	9690	9769	9863	9832	9910
1,8	9642	9786	9788	9881	—	—	—	—

Продолжение приложения 2

$T_0=293^\circ\text{K}$					$T_0=874^\circ\text{K}$			
Bi/S_k	0		0,5		0		0,5	
	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.	цен.	пов.
$T_c=1273^\circ\text{K}$					$S_k=2$			
0,05	2322	6493	2329	7068	6879	8773	6882	8915
0,1	2842	7598	2969	8027	7185	9162	7219	9272
0,15	3921	8229	4186	8568	7658	9375	7718	9463
0,2	5069	8650	5397	8919	8107	9519	8179	9590
0,25	6068	8957	6399	9170	8487	9628	8563	9683
0,3	6879	9189	7184	9359	8796	9707	8870	9754
0,35	7520	9357	7788	9504	9045	9770	9113	9809
0,4	8024	9505	8260	9615	9243	9819	9305	9851
0,5	8752	9693	8927	9767	9525	9887	9573	9909
0,6	9218	9815	9343	9861	9704	9931	9739	9945
0,8	9697	9930	9756	9949	—	—	—	—
$T_c=1773^\circ\text{K}$					$S_k=0,5$			
0,1	1787	3494	1841	4025	5056	6197	5088	6454
0,2	2497	4338	2782	4992	5584	6806	5720	7128
0,3	3355	5046	3846	5764	6169	7316	6395	7663
0,4	4170	5681	4796	6458	6721	7759	7007	8110
0,5	4914	6280	5610	7075	7222	8143	7539	8480
0,6	5582	6838	6320	7617	7668	8476	7996	8789
0,8	6746	7783	7494	8454	8396	8986	8700	9237
1,0	7693	8494	8351	9018	8923	9335	9173	9524
1,2	8415	9000	8941	9385	9238	9568	9480	9709
1,4	8936	9344	9331	9618	9535	9721	9680	9818
1,6	9297	9574	9581	9763	9698	9820	9799	9887
2,0	9702	9822	9824	9911	—	—	—	—
$T_c=1773^\circ\text{K}$					$S_k=2$			
0,05	1674	5781	1683	6503	4952	7743	4959	8054
0,1	2228	7031	2387	7677	5390	8468	5459	8708
0,15	3383	7866	3716	8322	6100	8871	6228	9058
0,2	4594	8389	4991	8742	6810	9140	6967	9287
0,25	5619	8765	6010	9041	7430	9334	7594	9452
0,3	6459	9045	6832	9263	7944	9482	8101	9577
0,35	7155	9258	7496	9432	8362	9594	8506	9672
0,4	7725	9422	8027	9560	8698	9682	8827	9745
0,5	8558	9646	8782	9734	9182	9804	9279	9845
0,6	9095	9785	9253	9842	9489	9880	9559	9907
0,7	9436	9868	9544	9904	9682	9926	9731	9944
0,9	9782	9950	9819	9962	—	—	—	—

С целью проверки правильности исходных предпосылок результаты численного интегрирования системы (1) ÷ (4) были сопоставлены с данными экспериментальных исследований нагрева изделий [6, 12, 13]. Результаты сравнения приведены на рис. 1 [6], 2 [12], 3 [13].

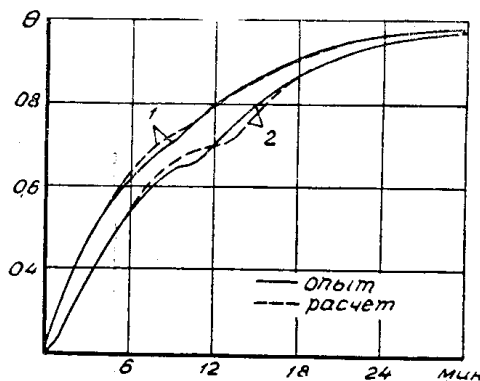


Рис. 1. Прогрев цилиндра из шарикоподшипниковой стали $\varnothing = 125$ мм: 1 — относительная температура на поверхности; 2 — относительная температура в центре.

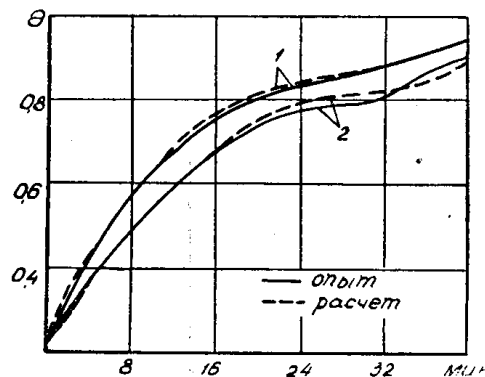


Рис. 2. Прогрев цилиндра из углеродистой стали (0,4%С) $\varnothing 100$ мм: 1 — относительная температура у поверхности цилиндра; 2 — относительная температура в центре.

Некоторое расхождение опытных и расчетных кривых может быть объяснено тем, что хотя структурные превращения в углеродистых сталях происходят в принятом температурном интервале, момент начала или конца фазовых превращений конкретной марки стали может несколько не совпадать с расчетным. Тем не менее, несмотря на некоторую погрешность, вносимую возможными несовпадениями, анализ сравнения показывает достаточно надежную сходимость расчетных данных с опытными. Последнее свидетельствует о достаточном соответствии принятой математической модели реальному физическому процессу нагрева металла.

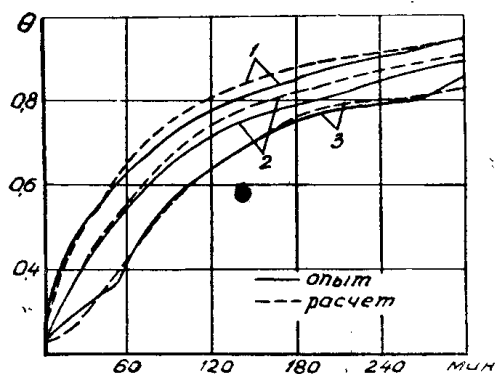


Рис. 3. Прогрев цилиндра из стали 45 $\times \varnothing 650$: 1 — относительная температура у поверхности цилиндра; 2 — относительная температура на глубине 85 мм; 3 — относительная температура в центре.

Используя приведенные в работе данные, можно легко определить распределение температур в стальных слитках. Кроме того, зная температуру поверхности

и температуру окружающей среды, можно найти неустановившийся тепловой поток на поверхности нагреваемого изделия.

Основные обозначения

$\theta = \frac{T}{T_c}$ — относительная температура;
 $2S$ — толщина пластины при симметричном нагреве м;

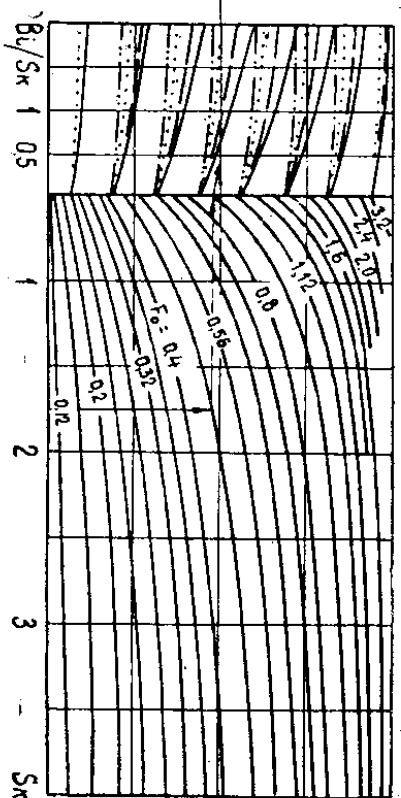
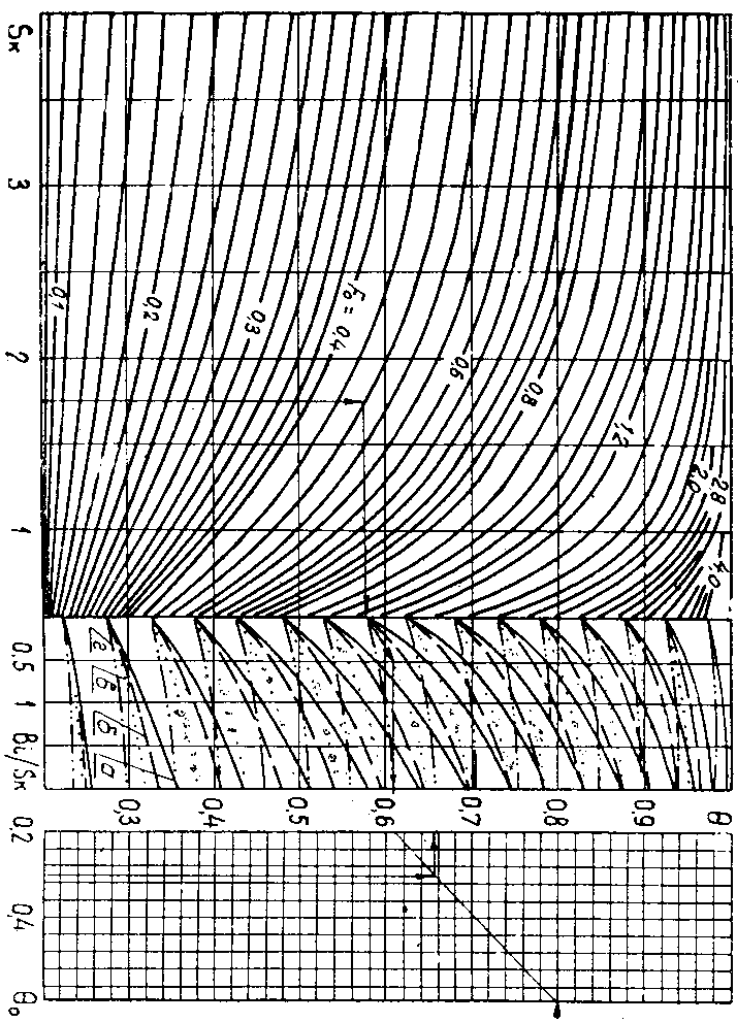


Рис. 4. Номограмма для определения относительной температуры центра пластины из аустенитной стали. а — $Sk = 0.5$, б — 1.0 , в — 2.0 , г — 4.0 .

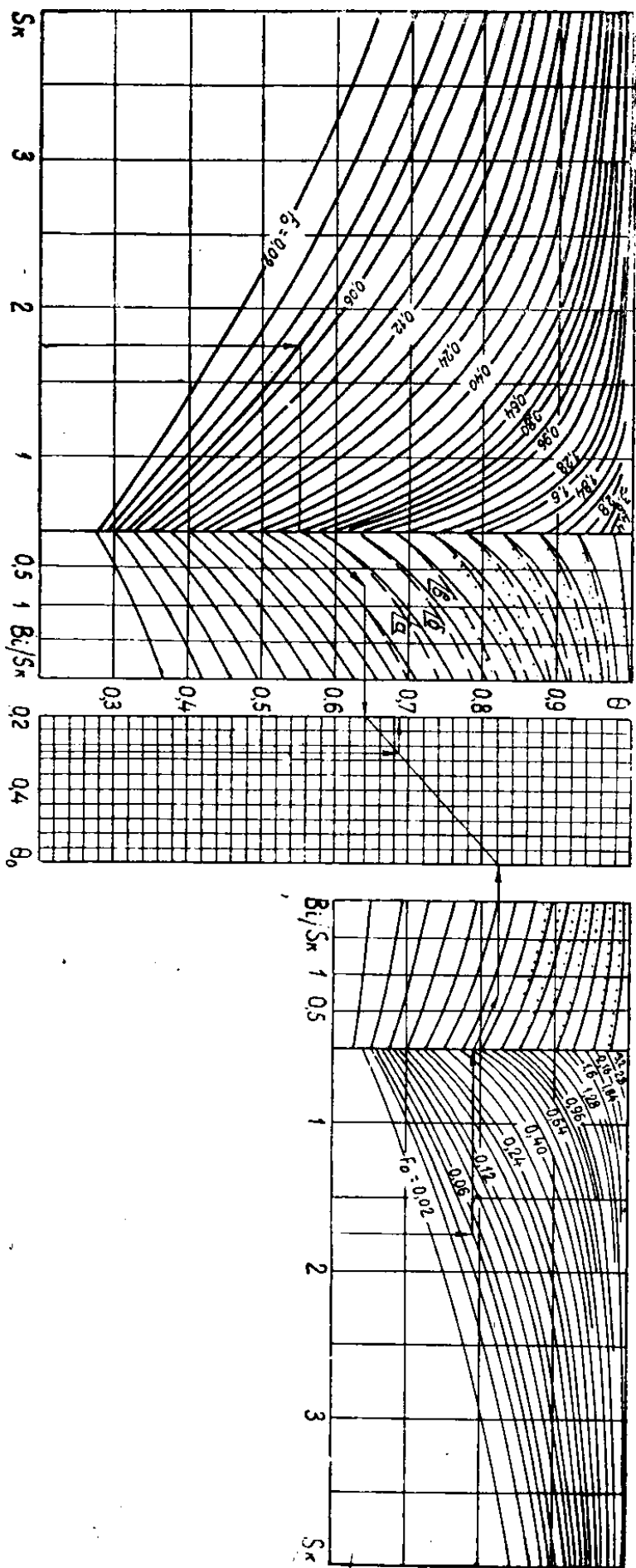


Рис. 5. Номограмма для определения относительной температуры поверхности пластины из аустенитной стали. а— $Sk = 0.5$, б— 1.0 , в— 2.0 , г— 4.0 .

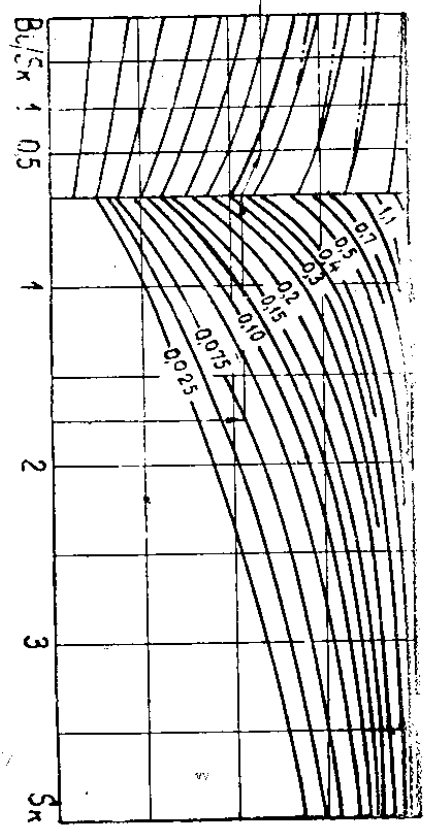
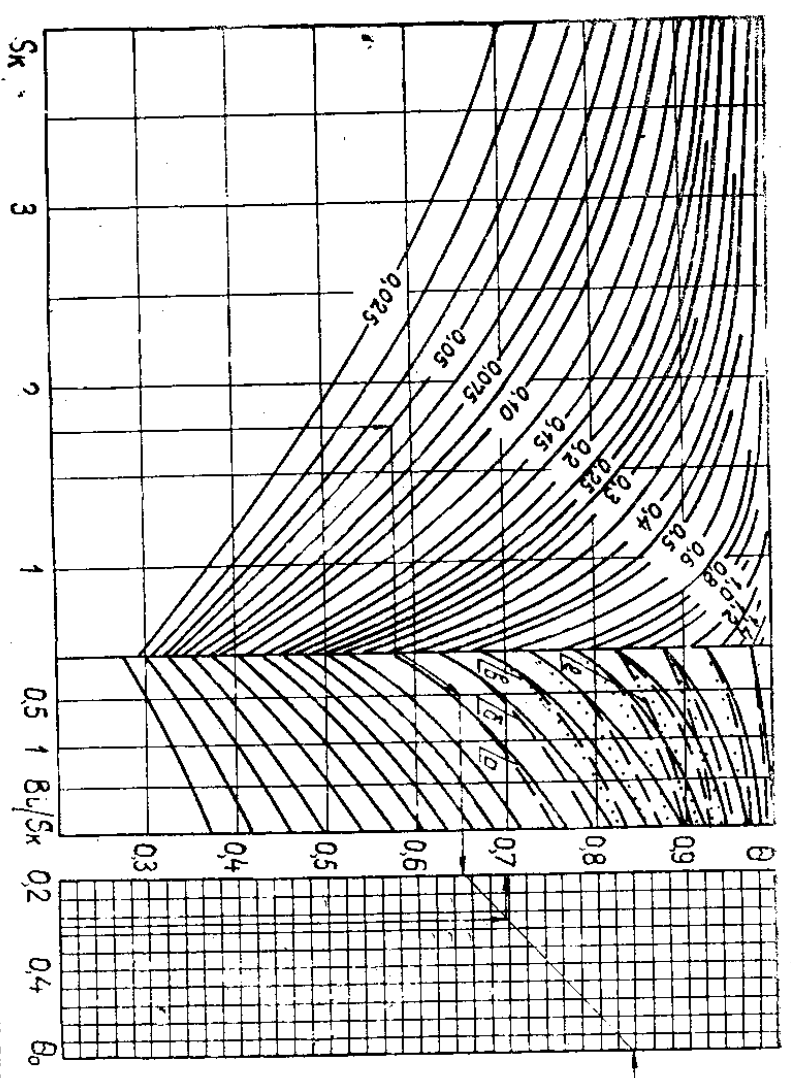


Рис. 6. Помогамма для определения относительной температуры центра цилиндра из аустенитной стали. а — $Sk = 0.5$, б — 1.0 , в — 2.0 , г — 4.0 .

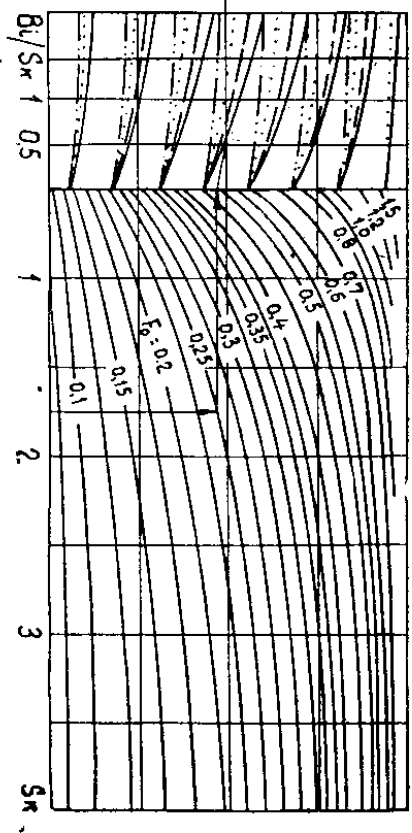
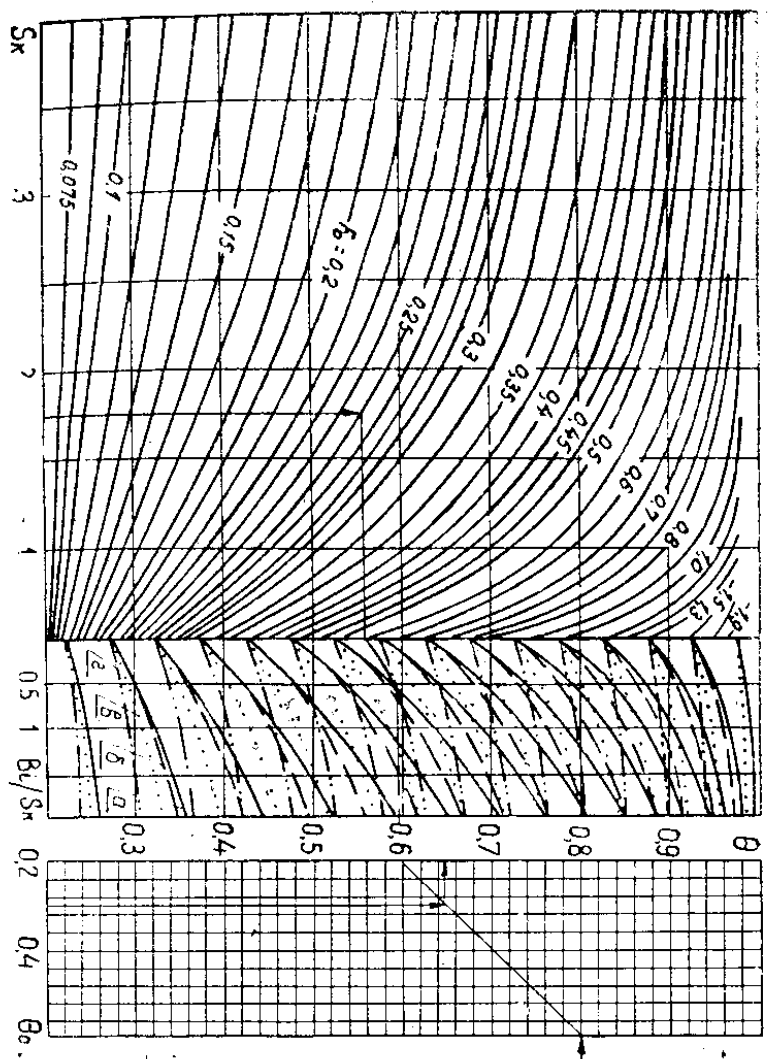


Рис. 7. Номограмма для определения относительной температуры поверхности цилиндра из аустенитной стали $d \rightarrow Sk = 0,5, 6-1,0, в \rightarrow 2,0, г \rightarrow 4,0$.

λ_0 — коэффициент теплопроводности при 273° К, *вт/м·град*;
 c_0 — теплоемкость при 273° К, *дж/кг·град*;

$$\xi = \frac{x}{S} \left(\text{или } \frac{r}{R} \right), \quad h = \frac{\Delta x}{S} = \frac{1}{N}$$

N — число слоев, на которое разделена толщина пластины (S) или радиус цилиндра (R);

$$S_k = \frac{\sigma_b T_c^3 S}{\lambda_0} \text{ — критерий Старка;}$$

$$Fo = \frac{\lambda_0}{c_0 \rho} \cdot \frac{\tau}{S^2} \text{ — критерий Фурье;}$$

$$Bi = \frac{\alpha S}{\lambda_0} \text{ — критерий Био.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Кавадеров, Ю. А. Самойлович. Сб. трудов ВНИИМТ, № 6, 1960.
2. Г. П. Бойков. Изв. ТПИ, том. 89, 1957.
3. Е. П. Блохин, А. В. Кавадеров. Бюллетень ВНИИМТ, № 3, 1958.
4. А. В. Кавадеров, Ю. А. Самойлович. Сб. трудов ВНИИМТ, № 10, 1963.
5. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. Гостехиздат, 1952.
6. А. Л. Немчинский. Тепловые расчеты термической обработки. Судпромгиз, 1953.
7. Д. Л. Тимрот. ЖТФ, 5, 6, 1935.
8. Б. Е. Неймарк. Теплоэнергетика, № 3, 1953.
9. Г. М. Бартенев. ЖТФ, 10, 1074, 1940.
10. Р. Черная. Качественная сталь, № 7, 1935.
11. А. В. Кавадеров, Ю. А. Самойлович. ИФЖ, 1, 1960.
12. В. Н. Соколов. Сб. статей под ред. В. Ф. Копытова. Нагрев стали и печи. 1949.
13. В. М. Дегтярев. Скоростной нагрев при термической обработке изделий крупных сечений. Машгиз, 1953.
14. Л. Коллатц. Численные методы решения дифференциальных уравнений, ИЛ., 1953.