

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОКАТА СПЛОШНЫМ ПОТОКОМ ВОДЫ

КГТМК «Криворожсталь»

Изложена методика расчета параметров линии ускоренного охлаждения проката высокоинтенсивным потоком воды. Область применения методики – охлаждение проката (круглого, арматурной стали, полосы, уголка) сплошным потоком воды при давлениях в камере охлаждения не ниже 15 кгс/см^2 .

Применяемая на комбинате “Криворожсталь” методика расчетов термокинетических параметров ускоренного охлаждения проката в потоке стана изложена в работах [1, 2]. Эта методика основана на трех допущениях:

1) Раскат рассматривается как простое геометрическое тело. В частности, арматурный прокат рассматривается как неограниченный цилиндр, лист и полоса – как неограниченная пластина.

2) Охлаждение рассматривается как внутренний процесс при частном случае условий первого рода. Раскат первоначально прогрет до температуры t_0 . Затем температура поверхности раската практически мгновенно снижается до температуры охлаждающей воды t_n и остается такой постоянно на протяжении всего процесса.

3) Теплофизические свойства изделия (в частности – коэффициент температуропроводности) не изменяются. Их можно рассматривать как константы.

Если принять эти три допущения, можно воспользоваться относительно несложными аналитическими методами [3, 4].

Каждое из принятых допущений вызывает ряд противоречий. В частности, последнее допущение не учитывает того, что сталь является материалом полиморфным, вследствие чего коэффициент температуропроводности в случае медленного охлаждения изменяется примерно в 6 раз [4]. Для устранения этого противоречия в работе [5] предложено использовать понятие **приведенный коэффициент температуропроводности** $a_{пр}$, т.е. такую величину коэффициента температуропроводности, которая, будучи подставлена в аналитические выражения, давала бы требуемое тождество.

Исследования, проведенные на комбинате “Криворожсталь” [6–8] имели цель уточнить влияние температуры начала и конца ускоренного охлаждения на величину приведенного коэффициента температуропроводности. Для этого образец из стали марки Ст5пс, ими-

тирующий бесконечную пластину подвергали ускоренному охлаждению высокотурбулентизованным потоком воды. Температура начала ускоренного охлаждения составляла 700°C (охлаждение без фазовых переходов) и 900°C (охлаждение с фазовыми переходами). При охлаждении фиксировали время охлаждения τ и температуру конца ускоренного охлаждения t_{yo} . Температуру поверхности принимали равной $t_n = 30^{\circ}\text{C}$.

Так как начальная температура t_0 составляла 700 или 900°C , рассчитывали относительную температуру конца ускоренного охлаждения $\Theta = \frac{t_{yo} - t_n}{t_0 - t_n}$. Из зависимости, показанной на рис. 1 определяли

число Фурье, соответствующее заданной относительной температуре ($Fo = \Phi(\Theta)$). Для того, чтобы обеспечить заданное число Фурье, приведенный коэффициент температуропроводности должен быть

равен $a_{np} = \frac{Fo \cdot S^2}{\tau}$, где S – толщина пластины.

$$\bar{\Theta} = \frac{t_{yo} - t_n}{t_0 - t_n} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo},$$

$$\text{где } Fo = \frac{a \cdot \tau}{S^2},$$

$$\mu_n = (2n-1) \cdot \frac{\pi}{2},$$

$$B_n = \frac{2}{\mu_n^2}.$$

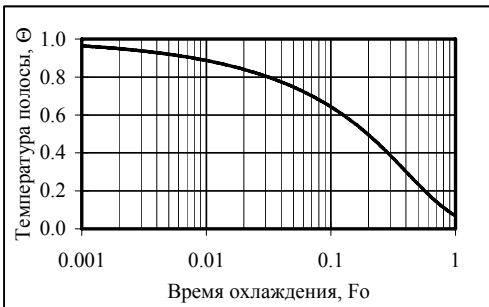


Рис. 1. Изменение средней по сечению температуры неограниченной пластины во времени (критериальная форма) [3].

Найденные значения приведенного коэффициента температуропроводности показаны на рис. 2а. Как видно из рисунка, a_{np} зависит как от начальной температуры, так и от

Величину $A(i)$ называли **интегральной величиной коэффициента температуропроводности** стали. Значения этой величины для исследуемой марки стали показаны на рис. 3.

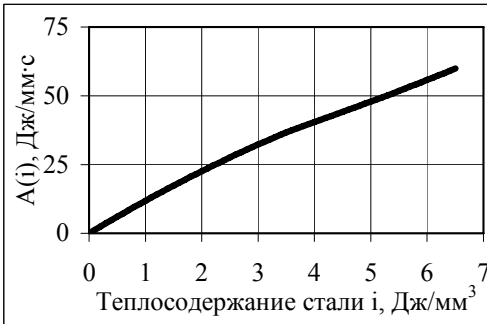


Рис. 3. Интегральная величина коэффициента температуропроводности $A(i)$ для стали марки Ст5пс.

Следует отметить, что $A(i)$ не зависит от температуры начала и конца ускоренного охлаждения стали, а также от температуры поверхности. Можно высказать предположение, что интегральная величина коэффициента температуропроводности не зависит и от условий охлаждения.

Полученные результаты позволили дополнить существующую методику расчета параметров ускоренного охлаждения проката сплошным потоком воды. С использованием этой методики произведен расчет охлаждения пластины толщиной 15 мм (одностороннее охлаждение) с температур 700 и 900⁰С. Результаты расчета показаны на рис. 4.

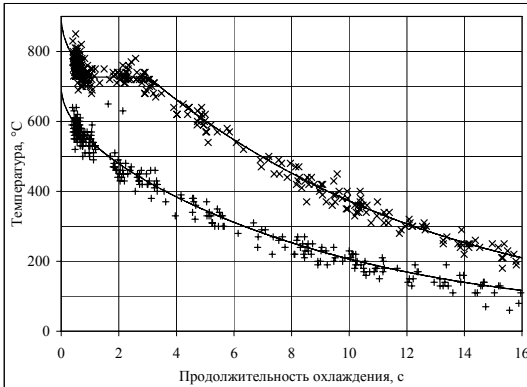


Рис. 4. Влияние продолжительности прерванного охлаждения на температуру конца ускоренного охлаждения. Экспериментальные (+, ×) и расчетные (линия) данные [8].

Для проверки влияния масштабного фактора произведены эксперименты по охлаждению образцов толщиной 5 и 10 мм с температуры 800⁰С в течение 1 и 2 с соответственно. Кроме этого, произведены эксперименты по охлаждению образцов толщиной 15 мм с 950 и 1000⁰С в течение 5 с. Результаты

экспериментов не противоречили данным, полученным расчетным путем. Таким образом, масштабный фактор не оказал влияния на величину приведенного коэффициента температуропроводности, а использование понятия интегральной величины коэффициента температуропроводности позволило произвести расчеты при разных значениях начальных температур.

Изложим полученную методику подробнее. Для этого рассмотрим две задачи: определение длины линии ускоренного охлаждения для получения необходимой температуры самоотпуска и определение температуры самоотпуска по заданной длине линии ускоренного охлаждения.

Постановка задачи 1: Прокат диаметром $2R$, движущийся со скоростью $v_{пр}$, охлаждается интенсивным потоком воды в устройстве проводкового типа (рис. 5) с температуры конца прокатки t_0 до температуры конца ускоренного охлаждения t_{yo} . Температура охлаждающей воды равна t_n , максимально допустимый разогрев охлаждающей воды принимается равным Δt_b . Необходимо определить длину зоны активного охлаждения $L_{зао}$ и минимальный расход охлаждающей воды Q_{min} .

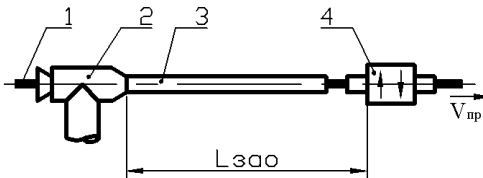


Рис. 5. Охлаждение движущегося проката в устройстве проводкового типа.

1— охлаждаемый раскат, 2— нагнетающая форсунка, 3— камера охлаждения, 4— узел сброса отработанной воды.

По таблице 1а определяем объемное (верхняя строка), теплосодержание стали в конце прокатки $i_0 = f(t_0)$, в конце ускоренного охлаждения $i_{yo} = f(t_{yo})$ и на поверхности раската $i_n = f(t_n)$.

Определяем относительное теплосодержание конца ускоренного охлаждения: $\Theta_i = \frac{i_{yo} - i_n}{i_0 - i_n}$.

Таблица 1а. Теплосодержание (объемное и массовое) стали марки Ст5пс при различных температурах [9]

Температура, °С	100	200	300	400	500	600	700
Объемное, Дж/мм ³	0,368	0,753	1,18	1,62	2,10	2,68	3,31
Массовое, кДж/кг	46,9	95,9	151	206	268	341	421
Температура, °С	800	900	1000	1100	1200	1250	
Объемное, Дж/мм ³	4,33	4,94	5,49	6,04	6,61	6,90	
Массовое, кДж/кг	551	628	699	768	842	878	

Таблица 1б. Зависимость температуры стали марки Ст5пс (°С) от объемного теплосодержания (Дж/мм³)

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0	27	54	82	109	135	161	187	211	235
1	259	282	305	327	350	373	396	418	439	460
2	481	500	518	536	553	570	587	603	620	638
3	654	670	685	699	711	721	731	740	748	756
4	765	774	785	796	809	824	840	857	875	893
5	911	929	947	965	984	1002	1020	1038	1057	1075
6	1093	1111	1128	1146	1164	1181	1198	1216	1233	1250

Определяем приведенный коэффициент температуропроводности в интервале теплосодержания $i_{y0} \div i_0$. Для этого по таблице 2 определяем интегральные величины коэффициента температуропроводности в начале $A(i_0)$ и в конце $A(i_{y0})$ охлаждения. Приведенный коэффициент температуропроводности равен

$$a_{np} = \frac{A(i_0) - A(i_{y0})}{i_0 - i_{y0}}.$$

Таблица 2. Интегральная величина коэффициента температуропроводности A [Дж/мм·с] при различном объемном теплосодержании i [Дж/мм³] стали марки Ст5пс

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,0	1,2	2,5	3,7	4,9	6,1	7,2	8,4	9,6	10,7
1	11,8	13,0	14,1	15,2	16,3	17,4	18,4	19,5	20,6	21,6
2	22,6	23,6	24,7	25,6	26,6	27,6	28,6	29,5	30,5	31,4
3	32,3	33,2	34,1	35,0	35,9	36,7	37,5	38,3	39,0	39,8
4	40,5	41,2	42,0	42,7	43,4	44,2	44,9	45,6	46,4	47,2
5	47,9	48,7	49,4	50,2	51,0	51,8	52,6	53,4	54,2	55,0
6	55,8	56,6	57,4	58,2	59,1	59,9				

По таблице 3б определяем число Фурье, обеспечивающее получение заданного относительного теплосодержания:

$$Fo = \Phi(\Theta_i).$$

В таблице 4б приведена аналогичная зависимость для неограниченной пластины.

Определяем время охлаждения:

$$\tau = \frac{Fo \cdot R^2}{a_{np}}.$$

В случае одностороннего охлаждения пластины вместо R необходимо использовать толщину S . В случае двухстороннего симметричного охлаждения пластины – половину толщины.

Длина зоны активного охлаждения должна составить

$$L_{3AO} = v_{np} \cdot \tau.$$

Количество металла, охлаждаемого в единицу времени равно

$$M = m \cdot v_{np},$$

где m – масса погонного метра профиля.

По таблице 1а определяем массовое (нижняя строка), теплосодержание стали в начале i_{m0} и в конце i_{myo} ускоренного охлаждения. Количество тепла, отдаваемое прокатом в единицу времени равно

$$q = M \cdot (i_{m0} - i_{myo}).$$

Минимальный расход охлаждающей воды составит

$$Q_{\min} = \frac{q}{\Delta t_6 \cdot c},$$

где $c = 4,19$ кДж/кг·°С – теплоемкость воды.

Пример расчета Арматурный прокат диаметром $2R = 14$ мм, имеющий температуру $t_0 = 1050^\circ\text{C}$ и движущийся со скоростью $v_{np} = 16,5$ м/с необходимо охладить до температуры $t_{yo} = 600^\circ\text{C}$. Температуру охлаждающей воды принять равной $t_{\text{п}} = 35^\circ\text{C}$, максимально допустимую температуру разогрева воды – $\Delta t_6 = 50^\circ\text{C}$. Найти длину зоны активного охлаждения L_{3AO} и минимальный расход охлаждающей воды $Q_{\min}$.

Объемное теплосодержание стали в конце прокатки составит:

$$\begin{aligned} i_0 &= i(t_0 = 1050^\circ\text{C}) = \\ &= i(t = 1000^\circ\text{C}) + \frac{1050 - 1000}{1100 - 1000} \cdot (i(t = 1100^\circ\text{C}) - i(t = 1000^\circ\text{C})) = \\ &= 5.49 + 0.5 \cdot (6.04 - 5.49) = 5.77 \text{ (Дж / мм}^3\text{)}, \end{aligned}$$

в конце ускоренного охлаждения –

$$i_{yo} = i(t_{yo} = 600^\circ\text{C}) = 2.86 \text{ Дж / мм}^3,$$

и на поверхности раската –

$$\begin{aligned}
 i_n &= i(t_n = 35^\circ \text{C}) = \\
 &= i(t = 0^\circ \text{C}) + \frac{35 - 0}{100 - 0} \cdot (i(t = 100^\circ \text{C}) - i(t = 0^\circ \text{C})) = \\
 &= 0.35 \cdot 0.386 = 0.129 \text{ (Дж / мм}^3\text{)}.
 \end{aligned}$$

Относительное теплосодержание в конце ускоренного охлаждения:

$$\Theta_i = \frac{i_{yo} - i_n}{i_0 - i_n} = \frac{2.68 - 0.129}{5.77 - 0.129} = 0.452.$$

Таблица 3а. Зависимость относительного теплосодержания неограниченного цилиндра от числа Фурье

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00	1,000	0,930	0,901	0,879	0,861	0,845	0,831	0,818	0,806	0,795
0,01	0,785	0,775	0,765	0,756	0,747	0,739	0,731	0,723	0,716	0,708
0,02	0,701	0,695	0,688	0,681	0,675	0,669	0,663	0,657	0,651	0,646
0,03	0,640	0,635	0,630	0,624	0,619	0,614	0,609	0,604	0,600	0,595
0,04	0,590	0,586	0,581	0,577	0,573	0,568	0,564	0,560	0,556	0,552
0,05	0,548	0,544	0,540	0,536	0,532	0,529	0,525	0,521	0,518	0,514
0,06	0,511	0,507	0,504	0,500	0,497	0,493	0,490	0,487	0,484	0,480
0,07	0,477	0,474	0,471	0,468	0,465	0,462	0,459	0,456	0,453	0,450
0,08	0,447	0,444	0,441	0,439	0,436	0,433	0,430	0,428	0,425	0,422
0,09	0,420	0,417	0,414	0,412	0,409	0,407	0,404	0,402	0,399	0,397
0,1	0,394	0,371	0,349	0,329	0,310	0,292	0,275	0,260	0,245	0,231
0,2	0,218	0,206	0,194	0,183	0,173	0,163	0,154	0,145	0,137	0,129
0,3	0,122	0,115	0,109	0,103	0,0968	0,0914	0,0862	0,0814	0,0768	0,0725
0,4	0,0684	0,0646	0,0610	0,0575	0,0543	0,0512	0,0484	0,0456	0,0431	0,0407
0,5	0,0384	0,0362	0,0342	0,0323	0,0305	0,0287	0,0271	0,0256	0,0242	0,0228
0,6	0,0215	0,0203	0,0192	0,0181	0,0171	0,0161	0,0152	0,0144	0,0136	0,0128
0,7	0,0121	0,0114	0,0108	0,0101	0,0096	0,0090	0,0085	0,0081	0,0076	0,0072
0,8	0,0068	0,0064	0,0060	0,0057	0,0054	0,0051	0,0048	0,0045	0,0043	0,0040
0,9	0,0038	0,0036	0,0034	0,0032	0,0030	0,0028	0,0027	0,0025	0,0024	0,0023
1	0,0021	0,0012	0,0007	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001			

Таблица 3б. Число Фурье, соответствующее заданному относительному теплосодержанию неограниченного цилиндра

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	∞	0.733	0.613	0.543	0.493	0.454	0.423	0.396	0.373	0.353
0.1	0.334	0.318	0.303	0.289	0.276	0.264	0.253	0.243	0.233	0.224
0.2	0.215	0.206	0.198	0.191	0.183	0.176	0.170	0.163	0.157	0.151
0.3	0.145	0.140	0.134	0.129	0.124	0.119	0.115	0.110	0.106	0.102
0.4	0.0976	0.0936	0.0898	0.0860	0.0824	0.0789	0.0755	0.0722	0.0690	0.0658
0.5	0.0628	0.0601	0.0573	0.0546	0.0520	0.0494	0.0469	0.0445	0.0422	0.0399
0.6	0.0377	0.0359	0.0338	0.0319	0.0300	0.0282	0.0265	0.0248	0.0232	0.0217
0.7	0.0202	0.0188	0.0174	0.0161	0.0149	0.0137	0.0126	0.0115	0.0104	0.0095
0.8	0.0086	0.0077	0.0069	0.0061	0.0054	0.0047	0.0041	0.0035	0.0030	0.0025
0.9	0.0021	0.0017	0.0013	0.0010	0.0007	0.0005	0.0003	0.0002	0.0001	

Таблица 4а. Зависимость относительного теплосодержания неограниченной пластины от числа Фурье

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00	1,000	0,964	0,950	0,938	0,929	0,920	0,913	0,906	0,899	0,893
0,01	0,887	0,882	0,876	0,871	0,866	0,862	0,857	0,853	0,849	0,844
0,02	0,840	0,836	0,833	0,829	0,825	0,822	0,818	0,815	0,811	0,808
0,03	0,805	0,801	0,798	0,795	0,792	0,789	0,786	0,783	0,780	0,777
0,04	0,774	0,772	0,769	0,766	0,763	0,761	0,758	0,755	0,753	0,750
0,05	0,748	0,745	0,743	0,740	0,738	0,735	0,733	0,731	0,728	0,726
0,06	0,724	0,721	0,719	0,717	0,715	0,712	0,710	0,708	0,706	0,704
0,07	0,701	0,699	0,697	0,695	0,693	0,691	0,689	0,687	0,685	0,683
0,08	0,681	0,679	0,677	0,675	0,673	0,671	0,669	0,667	0,665	0,663
0,09	0,661	0,660	0,658	0,656	0,654	0,652	0,650	0,649	0,647	0,645
0,1	0,643	0,626	0,609	0,593	0,578	0,563	0,549	0,535	0,522	0,509
0,2	0,496	0,484	0,472	0,460	0,449	0,438	0,427	0,417	0,406	0,396
0,3	0,387	0,377	0,368	0,359	0,350	0,342	0,333	0,325	0,317	0,310
0,4	0,302	0,295	0,288	0,281	0,274	0,267	0,261	0,254	0,248	0,242
0,5	0,236	0,230	0,225	0,219	0,214	0,209	0,204	0,199	0,194	0,189
0,6	0,184	0,180	0,176	0,171	0,167	0,163	0,159	0,155	0,151	0,148
0,7	0,144	0,141	0,137	0,134	0,131	0,127	0,124	0,121	0,118	0,115
0,8	0,113	0,110	0,107	0,105	0,102	0,100	0,0971	0,0947	0,0924	0,0902
0,9	0,0880	0,0858	0,0837	0,0817	0,0797	0,0778	0,0759	0,0740	0,0722	0,0705
1	0,0687	0,0537	0,0420	0,0328	0,0256	0,0200	0,0156	0,0122	0,0096	0,0075

Таблица 4б. Число Фурье, соответствующее заданному относительному теплосодержанию неограниченной пластины

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	∞	1,78	1,50	1,34	1,22	1,13	1,06	0,993	0,939	0,891
0,1	0,848	0,809	0,774	0,742	0,712	0,684	0,658	0,633	0,610	0,588
0,2	0,567	0,547	0,529	0,511	0,493	0,477	0,461	0,446	0,431	0,417
0,3	0,403	0,390	0,377	0,364	0,352	0,340	0,329	0,318	0,307	0,297
0,4	0,286	0,276	0,267	0,257	0,248	0,239	0,230	0,221	0,213	0,205
0,5	0,197	0,189	0,181	0,174	0,166	0,159	0,152	0,145	0,139	0,132
0,6	0,126	0,119	0,113	0,108	0,102	0,0962	0,0908	0,0855	0,0804	0,0755
0,7	0,0707	0,0661	0,0616	0,0573	0,0531	0,0491	0,0452	0,0415	0,0380	0,0346
0,8	0,0314	0,0284	0,0254	0,0227	0,0201	0,0177	0,0154	0,0133	0,0113	0,0095
0,9	0,0079	0,0064	0,0050	0,0039	0,0028	0,0020	0,0013	0,0007	0,0003	0,0001

Интегральная величина коэффициента температуропроводности в начале ускоренного охлаждения составит

$$\begin{aligned}
 A(i_0) &= A(5.77 \text{ Дж} / \text{мм}^3) = \\
 &= A(5.7 \text{ Дж} / \text{мм}^3) + \frac{5.77 - 5.7}{5.8 - 5.7} \cdot (A(5.8 \text{ Дж} / \text{мм}^3) - A(5.7 \text{ Дж} / \text{мм}^3)) = \\
 &= 53.4 + 0.7 \cdot (54.2 - 53.4) = 54.0 \text{ (Дж} / \text{мм} \cdot \text{с)},
 \end{aligned}$$

а в конце ускоренного охлаждения –

$$\begin{aligned}
 A(i_{yo}) &= A(2.68 \text{ Дж} / \text{мм}^3) = \\
 &= A(2.6 \text{ Дж} / \text{мм}^3) + \frac{2.68 - 2.6}{2.7 - 2.6} \cdot (A(2.7 \text{ Дж} / \text{мм}^3) - A(2.6 \text{ Дж} / \text{мм}^3)) = \\
 &= 28.6 + 0.8 \cdot (29.5 - 28.6) = 29.3 \text{ (Дж} / \text{мм} \cdot \text{с)}.
 \end{aligned}$$

Приведенный коэффициент температуропроводности в интервале теплосодержания $2,68 \div 5,77 \text{ Дж} / \text{мм}^3$ равен

$$a_{np} = \frac{A(i_0) - A(i_{yo})}{i_0 - i_{yo}} = \frac{54.0 - 29.3}{5.77 - 2.68} = 7.99 \text{ (мм}^2 / \text{с)}.$$

Число Фурье, обеспечивающее получение заданного относительного теплосодержания:

$$\begin{aligned}
 Fo &= \Phi(\Theta_i = 0.452) = \\
 &= \Phi(\Theta_i = 0.45) + \frac{0.452 - 0.45}{0.46 - 0.45} \cdot (\Phi(\Theta_i = 0.46) - \Phi(\Theta_i = 0.45)) = \\
 &= 0.0789 + 0.2 \cdot (0.0755 - 0.0789) = 0.0782.
 \end{aligned}$$

Время охлаждения раската до заданной температуры составит

$$\tau = \frac{Fo \cdot R^2}{a_{np}} = \frac{0.0782 \cdot 7^2}{7.99} = 0.480 \text{ (с)}.$$

Длина зоны активного охлаждения должна составить

$$L_{3AO} = v_{np} \cdot \tau = 16.5 \cdot 0.480 = 7.9 \text{ (м)}.$$

Масса погонного метра арматурного проката диаметром 14 мм (ДСТУ 3760–98) равна $m = 1.21 \text{ кг} / \text{м}$, количество металла охлаждаемого в единицу времени:

$$M = m \cdot v_{np} = 1.21 \cdot 16.5 = 20.0 \text{ (кг} / \text{с)}.$$

Массовое теплосодержание стали в конце прокатки составит

$$\begin{aligned}
 i_{0m} &= i_m(t_0 = 1050^\circ \text{C}) = \\
 &= i_m(t = 1000^\circ \text{C}) + \frac{1050 - 1000}{1100 - 1000} \cdot (i_m(t = 1100^\circ \text{C}) - i_m(t = 1000^\circ \text{C})) = \\
 &= 699 + 0.5 \cdot (768 - 699) = 734 \text{ (кДж} / \text{кг)},
 \end{aligned}$$

в конце ускоренного охлаждения:

$$i_{yom} = i_m(t_{yo} = 600^\circ \text{C}) = 341 \text{ кДж} / \text{кг},$$

количество тепла, отдаваемое прокатом в единицу времени равно

$$q = M \cdot (i_{m0} - i_{myo}) = 20.0 \cdot (731 - 341) = 7860 \text{ (кДж} / \text{с)}.$$

Минимальный расход охлаждающей воды составит

$$Q_{\min} = \frac{q}{\Delta t_g \cdot c} = \frac{7860}{50 \cdot 4.19} = 37.5 \text{ (кг} / \text{с)} \left[135 \text{ м}^3 / \text{час} \right].$$

Постановка задачи 2: Прокат диаметром $2R$, движущийся со скоростью v_{np} , охлаждается интенсивным потоком воды в устройстве проводкового типа длиной L_{3AO} (рис. 5). Температура конца прокат-

ки равна t_0 , температура охлаждающей воды – t_n . Определить температуру конца ускоренного охлаждения t_{yo} .

Обратная задача решается методом последовательной итерации. Сначала зададимся некоторой температурой конца ускоренного охлаждения $t_{зад}$. Исходя из этой температуры определяем приведенный коэффициент температуропроводности:

$$i_0 = f(t_0), i_{зад} = f(t_{зад}) \quad : (таблица 1a);$$

$$a_{np} = \frac{A(i_0) - A(i_{зад})}{i_0 - i_{зад}} \quad : (A(i) - таблица 2).$$

Определяем число Фурье Fo , соответствующее заданному времени охлаждения τ :

$$Fo = \frac{a_{np} \cdot \tau}{R^2}, \text{ где } \tau = \frac{L_{3AO}}{v_{np}}.$$

По таблице 3а определяем относительное теплосодержание проката при найденном числе Фурье $\Theta_i = F(Fo)$. По таблице 1а определяем объемное (верхняя строка), теплосодержание стали в конце прокатки $i_0 = f(t_0)$ и на поверхности проката $i_n = f(t_n)$, затем рассчитываем теплосодержание в конце ускоренного охлаждения:

$$i_{yo} = \Theta_i \cdot (i_0 - i_n) + i_n.$$

Если i_{yo} не соответствует $i_{зад}$, корректируем величину $i_{зад}$ и повторяем расчеты до тех пор, пока не получим $i_{yo} \approx i_{зад}$.

После получения удовлетворительной сходимости для i_{yo} , по таблице 1б определяем температуру конца ускоренного охлаждения: $t_{yo} = f^{-1}(i_{yo})$.

В предыдущем примере нами рассчитана длина линии ускоренного охлаждения $L_{3AO} = 7,9$ м, обеспечивающая охлаждение проката до 600°C . Определим насколько изменится температура конца ускоренного охлаждения при уменьшении длины линии на 1 м ($L_{3AO} = 6,9$ м).

Из предыдущего решения имеем $t_0 = 1050^\circ\text{C}$, $i_0 = 5,77$ Дж/мм³, $A(i_0) = 54,0$ Дж/мм·с, $t_n = 35^\circ\text{C}$, $i_0 = 0,129$ Дж/мм³.

Из условия настоящей задачи:

$$\tau = \frac{L_{3AO}}{v_{np}} = \frac{6,9}{16,5} = 0,418 \text{ (с)}.$$

Зададимся начальной расчетной температурой $t_{зад}$ равной 650°C . Последовательность итераций приведена в таблице:

$t_{\text{зад}},$ °C	$i_{\text{зад}},$ Дж/мм ³	$A(i_{\text{зад}}),$ Дж/мм·с	$a_{\text{пр}},$ мм ² /с	Fo	Θ_i	$i_{\text{yo}},$ Дж/мм ³
650	3,00	32,3	7,82	0,0667	0,488	2,88
	2,88	31,2	7,89	0,0673	0,486	2,87
	2,87	31,1	7,90	0,0674	0,486	2,87

Окончательно получаем $i_{\text{yo}} = 2,78 \text{ Дж/мм}^3$. По таблице 16 определяем $t_{\text{yo}} = f^{-1}(i_{\text{yo}} = 2,78 \text{ Дж/мм}^3) = 617^\circ\text{C}$. Таким образом, уменьшение длины зоны активного охлаждения на 1 м (на 12,7 %) приведет к увеличению температуры конца ускоренного охлаждения на 17°C (снижение степени охлаждения на 3,8 %).

Предлагаемая методика легко алгоритмизируется с использованием относительно простых вычислительных систем. Как показано в работе, применима и при “ручном” расчете. Область применения методики – охлаждение проката (круглого, арматурной стали, полосы, уголка) сплошным потоком воды при давлениях в камере охлаждения не ниже 15 кгс/см^2 .

1. *Расчет* длины устройств для охлаждения проката сплошным потоком воды /Худик В.Т., Черненко В.Т., Сиухин А.Ф., Литовченко Ю.К. // *Металлургия и коксохимия*. – Вып. 36. – Киев: Техніка, 1973. – С. 68–72.
2. *Высокопрочная* арматурная сталь. / Кугушин А.А., Узлов И.Г., Калмыков В.В. и др. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
3. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. –М., Высшая школа, 1967. – 600 с.
4. *Тайц Н.Ю.* Технология нагрева стали. – М., Металлургиздат, 1962. – 568 с.
5. *Расчет* температурного поля при охлаждении толстых листов./ Э.А.Орлов, В.И.Спиваков, А.М.Новиков, И.Е.Васильева // В сб. «Термическая обработка металлов», № 4. –М., Металлургия, 1975. – С. 27–30.
6. *Приведенный* коэффициент температуропроводности при прерванном охлаждении / В.Т.Худик, И.А.Гунькин, И.И.Журавлев, Е.В.Приходько // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов*. Вып. 12. – Днепропетровск: ПГСИА, 2001. – С. 92–93.
7. *Приведенный* коэффициент температуропроводности при прерванном охлаждении / В.А.Шеремет, И.А.Гунькин, И.И.Журавлев // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов*. Вып. 15, Часть I. – Днепропетровск: ПГСИА, 2002. – С. 86–88.
8. *Приведенный* коэффициент температуропроводности при прерванном охлаждении / А.В.Кекух, И.А.Гунькин, Н.П.Жильцов // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов*. Вып. 22, Часть II. – Днепропетровск: ПГСИА, 2003. – С. 114–117.
9. *Теплофизические свойства веществ*. Справочник. Под ред. Варгафтика Н.Б. М.: Физматгиз, 1956. – 320 с.