

УДК 621. 365

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДУГОВИХ ВАКУУМНИХ ПЕЧЕЙ

Г. О. Ремізов, А. І. Холодченко

*Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут”*

Висвітлено загальні відомості про вакуумно дугову плавку. Проведена методика розрахунку системи охолодження тепло навантажених елементів і вузлів печі. Особливу увагу приділено розробці надійної системи охолодження кристалізатора і піддону.

Отражены общие сведения о вакуумной дуговой плавке. Проведенная методика расчета системы охлаждения тепло нагруженных элементов и узлов печи. Особенное внимание уделено разработке надежной системы охлаждения кристаллизатора и поддона.

General information is related to vacuum arc melting. Conducted method of calculation of the system of cooling warmly of the loaded elements and knots of stove. The special attention is spared development of the reliable system of cooling of chill mould and pallet.

Вступ

В дугових вакуумних печах до теплонавантажених елементів належать: кристалізатор, піддон, шток електродотримача, корпус пічної камери.

Особливу увагу слід приділяти розробці надійної системи охолодження кристалізатора і піддону, оскільки вони піддаються найбільшим тепловим навантаженням, які обумовлюють потенційну вибухобезпечність ДВП.

Методика розрахунку і результати дослідження

1. Кристалізатор

Найбільший тепловий потік (щільністю до $0,5 \dots 1,3 \text{ МВт/м}^2$) сприймає кокіль кристалізатора в зоні контакту з рідкою металевою ванною.

При можливому запаленні дуги на стінку кристалізатора локальне теплове навантаження досягає $20 \dots 40 \text{ ГВт/м}^2$. Виходячи з цього кокіль (формуюча частина) кристалізатора виготовляють з матеріалів, що мають

високу теплопровідність (з міді або бронзи БрХ-08; $\lambda=350-420 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Це дозволяє при товщині стінки кокілю 10...30 мм відводити тепловий потік від зони тепловиділення уздовж стінки і знизити щільність теплового потоку на тепловіддаючій поверхні. Як теплоносій застосовують зазвичай хімічно очищену воду, яка внаслідок великих значень питомої теплоємності і теплоти фазового переходу при пароутворенні дозволяє отримати коефіцієнти тепловіддачі (λ_e) до $10 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Охолодження кристалізаторів може відбуватися:

- у конвективному режимі руху рідини (найбільш раціональний режим роботи системи);
- у режимі бульбашкового кипіння.

Тепловідвід в цих режимах, а також методики визначення величин і параметрів системи охолодження мають свої особливості.

Конвективний тепловідвід здійснюється при виконанні наступних умов:

$$k \cdot q_e < q_{н.к} \quad (1)$$

де k – коефіцієнт запасу (1,1–1,5) залежно від форми системи охолодження кристалізатора;

q_e – тепловий потік, що передається до води, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

$q_{н.к}$ – тепловий потік, при якому починається кипіння хладагента (води), $\text{Вт}/\text{м}^2$; і

$$t_{cm} < t_{кин} \quad (2)$$

де t_{cm} – температура теплосприймаючої стінки, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{кин}$ – температура кипіння води, $^{\circ}\text{C}$.

В реальних умовах t_{cm} може перевищувати $t_{кин}$ води на 40-50 $^{\circ}\text{C}$ (залежно від тиску в системі охолодження) без виникнення кипіння. Це перевищення в розрахунках не враховують, що дає певний ступінь запасу.

Для охолодження кристалізаторів в конвективному режимі в більшості випадків необхідно підтримувати швидкість води вздовж охолоджуваної поверхні в межах від 1,5 до 4,5 м/с, що пред'являє певні вимоги до системи охолодження забезпечити таку швидкість води і певні її витрати для підтримки конвективного режиму система водопостачання підприємства інколи не в змозі. В цьому випадку охолодження кристалізатора необхідно проводити в режимі бульбашкового кипіння.

Тепловідведення в режимі бульбашкового кипіння має місце за умови:

$$q_{н.к} < k \cdot q_e < q_{кр} \quad (3)$$

де $q_{кр}$ – тепловий потік, при якому бульбашковий режим кипіння змінюється на плівковий.

Величина теплового потоку, при якому починається плівкове кипіння визначається співвідношенням:

$$q_{кр} = 4,2 \cdot 10^4 \cdot v_g^{0,5} \cdot P_g^{0,33}, \text{Вт/м}^2 \quad (4)$$

де v_g – швидкість руху води (складає при цьому режимі 0,1 – 1,0 м/с);

P_g – тиск води в системі охолодження, Па.

Перехід від бульбашкового кипіння до плівкового відбувається при певних параметрах потоку, носить кризисний характер і в системі охолодження не допустимий. Це обумовлено тим, що тепловіддача до пари значно нижча, ніж тепловіддача до рідини. При цьому температура поверхні різко зростає і може досягати 600 °С і вище. При охолодженні в режимі бульбашкового кипіння слід звертати увагу на забезпечення рівномірного розподілу швидкості потоків в системі охолодження. При цьому накладаються додаткові вимоги на якість технічної води, що забезпечує безнакипний режим.

Умовою надійної і безпечної роботи системи охолодження кристалізатора є збереження співвідношення:

$$\frac{q_{\max}}{q_{кр}} < (0,33 - 0,5) \quad (5)$$

Для квазістаціонарного стану процесу переплавки, коли швидкість плавлення дорівнює швидкості кристалізації, практично вся тепла потужність (P_d), що виділяється в ДВП, виходить в систему охолодження кристалізатора.

Об'ємна витрата теплоносія (V_g) залежить від теплового потоку ($Q_{кр} = P_d$), що відводиться від охолоджуваної поверхні, та зміни об'ємної ентальпії 1 м³ теплоносія при його температурі на вході ($t_g^{вх}$) колектора, що підводить, до температури на виході ($t_g^{вих}$) в зливному колекторі:

$$V_g = \frac{Q_{кр}}{\gamma_{рід} \cdot c_{рід} (t_{вих}^g - t_{вх}^g)} = \frac{Q_{кр}}{\gamma_{рід} \cdot \Delta H_{рід}} \cdot \text{м}^3/\text{с} \quad (6)$$

Для розрахунків фізичні властивості теплоносія (табл.1.) приймають для середньої температури рідини $t_{рід} = 0,5(t_{вих} + t_{вх})$

Л. Н. Белянчиков [1], виходячи з умов $q_{кин} < q_{кр}$ при плавіці сплавів на основі заліза і нікелю при тиску води $(3 - 4) \cdot 10^5$ Па для визначення витрати води на охолодження кристалізатора, пропонує емпіричну формулу:

$$V_{кр.р} \geq 0,65 \cdot D_{кр} \cdot \delta_{зав} \cdot \text{м}^3/\text{с} \quad (7)$$

Для інтенсифікації теплообміну при високих теплових навантаженнях, характерних для кристалізаторів ДВП, в порожнину системи охолодження встановлюють керуючий вкладиш (рис. 1.) на

відстані 5 – 10 мм від кокілю. Це дозволяє створити швидкість руху води в каналі охолодження 0,5 – 1,5 м/с.

Таблиця 1. Фізичні властивості води

Властивість	Температура води, °С				
	20	30	40	50	100
$\gamma, \text{кг} / \text{м}^3$	998,20	995,70	992,20	988,10	958,40
$\Delta H, \text{кДж} / \text{кг}$	83,90	125,70	167,50	209,30	419,10
$C_p, \text{кДж} / (\text{кг} \cdot ^\circ \text{C})$	4,18	4,17	4,17	4,17	4,22
$\alpha, \text{Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$	0,60	0,62	0,63	0,65	0,68
$a \cdot 10^{-8}, \text{м}^2 / \text{с}$	14,40	14,90	15,20	15,80	16,80
$\vartheta \cdot 10^{-6}, \text{м}^2 / \text{с}$	1,00	0,80	0,66	0,56	0,30
P_z	6,90	5,40	4,30	3,50	1,80

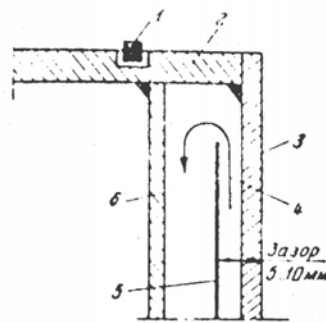


Рис. 1. Вкладиш в системі охолодження кристалізатора

1 – вакуумне ущільнення; 2 - фланець; 3 – стінка кристалізатора (мідь); 4 – напрям потоку води; 5 - перегородка; 6 – зовнішня стінка оболонки

При цьому інтенсивність тепловіддачі визначається взаємодією турбулентних пульсацій, що обумовлені примусовою конвекцією, та пульсацій можливого шару при бульбашковому кипінні:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{\alpha_{\text{конв}} (4\alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{кип}})}{5\alpha_{\text{конв}} - \alpha_{\text{кип}}}, \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (8)$$

де $\alpha_{\text{конв}}$ – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$\alpha_{\text{кип}} = 4,44 \cdot q^{0,7} \cdot p^{0,15}$ – коефіцієнт тепловіддачі при бульбашковому кипінні, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

q_v – щільність теплового потоку на охолоджуваній поверхні, $\text{Вт} / \text{м}^2$;

p – тиск хладагента, МПа (для води 0,25 – 0,3 МПа).

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі визначається згідно з

формулою:

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{\lambda_{\text{в}} \cdot Nu}{d_{\text{екв}}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (9)$$

де Nu – критерій Нуссельта руху хладагента ($Re > 10^4$), визначається згідно, при турбулентному режимі, рівнянню:

$$Nu_p = 0,021 \cdot Re_p^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot k_l \quad (10)$$

$\lambda_{\text{в}}$ – теплопровідність води при $t_{\text{в}}$ °С;

$d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр каналу (для щілини $d_{\text{екв}} = 2\delta_{\text{заз}}$, для каналів складної форми $d_{\text{екв}} = 4 \cdot F / \Pi$; F – площа перетину каналу, Π – периметр перетину каналу);

$Re = \frac{V_{\text{в}} \cdot d_{\text{екв}}}{\nu_{\text{в}}}$ - критерій Рейнольда

$V_{\text{в}}$ – швидкість потоку в каналі, м/с

$\nu_{\text{в}}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м²/с;

$Pr_p, Pr_{ст}$ - критерій Прандля для води при її температурі (Pr_p) і для води при температурі стінки (кокілю) з боку води.

k_l – коефіцієнт, що враховує зміну середнього значення $\alpha_{\text{конв}}$ по довжині кокілю;

l – довжина (висота) плоскої стінки уздовж потоку теплоносія (табл. 2.).

На наступному етапі проводиться гідравлічний розрахунок системи охолодження кристалізатора виходячи із значення швидкості води уздовж охолоджуваної поверхні кристалізатора за звичайною методикою для теплообмінників [2].

Гідравлічний розрахунок системи охолодження кристалізатора зводиться до визначення витрат тиску на шляху проходження води від входу з роздавального колектора цехової магістралі до виходу в зливний пристрій.

Тиск на різних ділянках кристалізатора визначається як сума втрат напорів в усіх елементах системи охолодження.

Джерелом гідравлічних втрат при русі рідини є опір тертю ($f_{\text{тр}}$) і місцеві опори ($f_{\text{м.оп}}$):

$$P_{\text{кр}} = f_{\Sigma} \frac{\gamma_{\text{в}} \cdot \nu_{\text{в}}}{2g} \quad (11)$$

де $f_{\Sigma} = (f_{\text{тр}} + f_{\text{м.оп}})$

Гідравлічні втрати при швидкості руху води до 3 м/с зазвичай невеликі і не перевищують $200 \text{ кН}/\text{м}^2 = 0,2 \text{ Па}$.

Таблиця 2. Значення коефіцієнта k_1 при різних значеннях $l/D_{кр}$.

Re_p	Відношення l/D								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
	Ламінарний режим								
	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00
	Турбулентний режим								
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1,00
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,00
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,00
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,00
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00

При охолодженні кристалізатора технічною водою в режимі кипіння на стінці відбуватиметься інтенсивне утворення накипу. Це істотно обмежує число плавок, які можуть бути проведені в кристалізаторі без очищення його від накипу.

Розрахунок кількості плавок, що проводяться без очищення кристалізатора від накипу ведеться на підставі даних про жорсткість вживаної води.

Гранична товщина шару накипу визначається за формулою [3]:

$$\delta_{нак}^{zp} = \lambda_{нак} \left(\frac{t_{ст}^{zp} - t_{ст}^g}{q_g} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} \right), м \tag{12}$$

де $\lambda_{нак}$, $\lambda_{ст}$ – теплопровідність відповідно шару накипу (1,16 Вт/(м·К) і кокілю кристалізатора (для міді дорівнює 380 Вт/(м·К));

$t_{ст}^{zp}$ – гранично допустима температура (по умові міцності) стінки кокілю (для міді – 300 °С).

Для визначення об'єму води, що випаровує з поверхні, за 1 годину роботи кристалізатора ($V_{нап}$) слід виходити з протяжності зони контакту рідкого металу безпосередньо з кристалізатором, яка на підставі експериментальних даних для ДВП [3] описується рівнянням:

$$l_{р.ме-кр} = \frac{k_3 \cdot P_{\delta}}{D_{кр}}, м \tag{13}$$

де k_3 – коефіцієнт (для сталі і титану дорівнює $8 \cdot 10^{-5} м^2/кВт$)

2. Піддон і витрата хладагента

Піддон закриває знизу плавильний простір, утворений кристалізатором, і є основою, на якій починається виплавка зливка. Для розміщення піддону

гільзу кристалізатора в нижній частині спеціально розточують. Форма піддону відповідає конфігурації зливків, що виплавляються.

В момент запалення дуги і утворення ванни рідкого металу, тобто на початку плавки піддон сприймає значні теплові навантаження. При запаленні дуги на відкритій (без «затравки») робочій плиті піддону (виготовляється з міді або хромистої бронзи БрХ-08, БрХ-1) тепловий потік відповідає анодній потужності дуги, сягаючи інколи до $1,5 \text{ МВт/м}^2$.

При плавці з темплетом, який захищає піддон від безпосередньої дії дуги, максимальне теплове навантаження виникає в момент проплавлення темплета і попадання розплаву на піддон (так, наприклад, при плавці титану середній тепловий потік знижується від 610 до 140 кВт/м^2 для зливка діаметром 0,19 м і від 200 до 46 кВт/м^2 – для зливка діаметром 1,4 м).

За рахунок безпосереднього контакту розплаву з піддоном коефіцієнт тепловіддачі за експериментальними даними при переплавці сталі і титану складає $1000 - 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ [3].

Тепловий потік, що сприймається піддоном, визначається розрахунковим шляхом згідно із законом Фур'є:

$$q = \frac{\lambda}{\delta_{p.пл}} (T_z - T_{вн}), \text{Вт/м}^2 \quad (14)$$

де λ – теплопровідність робочої плити, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$;

$\delta_{p.пл}$ – товщина робочої плити, м;

$T_z, T_{вн}$ – температури зовнішньої і внутрішньої поверхні плити, К.

Температуру зовнішньої поверхні робочої плити можна прийняти рівною $300 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$, оскільки до цієї температури мідь зберігає властивості міцності.

Дія навантаження на робочу плиту, згідно умовам міцності, не повинна перевищувати $0,3 \text{ МПа}$.

Згідно з умовами жорсткості (допустимої напруги) і максимально припустимого прогину плити (не більше 1 мм) товщина мідної робочої плити піддону циліндричного зливка може бути визначена за формулою:

$$\delta_{p.пл} \approx 0,158 D_{кр}^{4/3}, \text{ м} \quad (15)$$

Після визначення товщини робочої плити, виконання теплового і гідравлічного розрахунків проводиться перевірочний розрахунок плити на її міцність.

Для мідної робочої плити піддону циліндричного кристалізатора максимальна напруга визначається за формулою:

$$\sigma_{\max} = 0,55 \left(\frac{D_{кр}}{\delta_{p.пл}} \right)^2, \text{ МПа} \quad (16)$$

а максимальне значення прогину плити:

$$\omega_{\max} = 4 \cdot 10^{-7} \frac{D_{кр}^4}{\delta_{р.пл.}^3} \text{ м} \quad (17)$$

Для охолодження піддону вода подається в його центральну частину і відводиться з порожнини під спіраллю. Швидкість руху води в зазорі 5...10 мм за допомогою спіралі, що керує потоком води, збільшується до 2...3 м/с.

Зазвичай об'ємна витрата води в піддоні розраховується за умов тепловідводу половини потужності дуги, тобто:

$$V_{\text{нід}}^e \geq \frac{0,5P_d}{c_e \cdot \gamma_e \cdot \Delta t} \text{ м}^3/\text{с} \quad (18)$$

де c_e – теплоємність води, кДж/(кг·К);

γ_e – щільність води, кг/м³;

Δt – різниця температур води, що охолоджує, на виході і вході в піддон ($\Delta t \approx 30$ °С).

При плавці сталей і сплавів на основі заліза і нікелю (при $I_p = j_{\text{онт}} D_{кр}$) запропонована спрощена емпірична залежність [5]:

$$V_{\text{нід}}^e \geq 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot D_{кр} \text{ м}^3/\text{с} \quad (19)$$

3. Охолодження конструктивних елементів установки

В дугових вакуумних печах охолоджуються водою також шток електродотримача, корпус камери і вакуумні насоси. Для розрахунку цих елементів необхідно мати відомості про їх геометричні розміри та конструктивне виконання. Проте в паспортних даних про технічні характеристики установки відповідні відомості часто відсутні.

Тому орієнтовно можна визначити витрату води на охолодження цих елементів на підставі аналізу даних ДВП, що діють, для плавки стали і сплавів на основі заліза і нікелю.

Так, наприклад, Белянчиков Л.Н. [1] для цього пропонує емпіричні формули для дугових вакуумних печей, виходячи з діаметра кристалізатора ($D_{кр}$).

Зважаючи на відсутність відповідних відомостей про дугові вакуумні гарнісажні печі при розрахунку охолодження конструктивних елементів можливо виходити з діаметра ванни рідкого металу в тиглі (D_6).

3.1. Охолодження штока електродотримача

Шток електродотримача піддається максимальному тепловому навантаженню в кінці плавки при мінімальній довжині витратного електрода,

тобто коли від нього залишається лише «огарок». При цьому зростає його температура з урахуванням потужності електричних витрат у штоці виникає максимальний тепловий потік.

Досить точно визначити теплове навантаження на шток практично не можливо зважаючи на складність конструктивного виконання голівки електродотримача.

Для наближених розрахунків (при виплавці злиwkів сталі) можна рекомендувати формулу [4]:

$$V_{шт}^s \geq 6 \cdot 10^{-4} D_{кр} + \frac{P_{дж}}{c_s \cdot \gamma_s \cdot \Delta t} \quad (20)$$

або

$$V_{шт}^s \geq D_{кр} \cdot 10^{-3} M^3/c \quad (21)$$

де $P_{дж}$ – Джоулеве тепло штока:

$$P_{дж} = \frac{4\rho \cdot l_{шт} \cdot I_p^2}{\pi(d_1^2 - d_2^2)}, Вт \quad (22)$$

ρ – питомий електроопір матеріалу штока, Ом·м;

$l_{шт}$ – довжина штока, м;

d_1 і d_2 – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри штока, м.

Зазвичай система охолодження штока електродотримача орієнтовно розраховується на відведення 10...15% потужності дуги.

3.2. Охолодження корпусу пічної камери

На корпус печі робочої камери доводиться кількість тепла, що дорівнює сумі теплових втрат від електроду (P_e) і втрат випромінюванням із незаекранованої електродом поверхні рідкого металу ($P_{e\text{ випр}}$):

$$P_{кам} = P_e + P_{e\text{ випр}}, кВт \quad (23)$$

Витрати води на охолодження корпусу пічної камери складе:

$$V_{п.к.}^s = \frac{P_{кам}}{c_s \cdot \gamma_s \cdot \Delta t} M^3/c \quad (24)$$

Зазвичай система охолодження робочої камери розраховується виходячи з умов відведення (15...20)% потужності дуги (P_d).

Наближений розрахунок для визначення витрат на охолодження корпусу робочої камери може бути виконаний за емпіричною формулою (для сталі і сплавів на основі заліза і нікелю) [5]:

$$V_{п.к.}^s = 10^{-2} (0,06 \cdot D_{кр} + 0,07 \cdot D_{кр}^2) M^3/c \quad (25)$$

4. Загальна втрата води на охолодження ДВП за час циклу плавки

Кристалізатор та піддон охолоджуються водою на протязі періодів плавки і охолодження зливка. Тривалість охолодження можна розрахувати за формулою, отриманої експериментально:

$$\tau_{ox.} \approx D_{зл.} \cdot 10^4, c \quad (26)$$

Шток та корпус робочої камери охолоджуються тільки на протязі періоду плавки. Значна частина води витрачається на охолодження вакуумних насосів (V_n) які працюють на протязі всього циклу плавки.

Для орієнтаційних розрахунків для печей які плавлять сталі та сплави на основі заліза та нікелю можна користуватися наступним виразом:

$$V_n \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (D + 0,2), m^3 / c \quad (27)$$

Таким чином, загальна втрата води на охолодження печі становить:

$$V_{\Sigma H_2O} = (V_{кр} + V_{підд}) \cdot (\tau_{пл} + \tau_{ox.}) + (V_{шт} + V_{корп.к}) \cdot (\tau_1 + \tau_{пл}) + V_n \cdot (\tau_1 + \tau_{пл}), m^3 \quad (28)$$

При цьому питома втрата води на 1 кг чорних зливків складатиме:

$$m_{пит.} = \frac{V_{\Sigma H_2O}}{M_{зл}}, m^3 / кг \quad (29)$$

Тоді питома втрата води на 1 кг чистих зливків буде дорівнювати:

$$\overline{m_{пит.}} = 1,075 \cdot \frac{V_{\Sigma H_2O}}{M_{зл} \cdot \left(1 - \frac{D_{кр}}{2 \cdot L_{зл}}\right)}, m^3 / кг \quad (30)$$

Висновки

Отже, виходячи з представлених результатів можна сказати, що розроблена методика є достовірною, і може використовуватись для практичних розрахунків систем охолодження елементів вакуумно – дугових печей.

Література

1. Беляничков Л. Н. Основы расчёта дуговых вакуумных печей. М.: Металлургия, 1968.- 100 с.
2. Волохонский Л. А. Вакуумные дуговые печи. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
3. Егоров А. В. Расчёт мощности и параметров электрических печей металлургии. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
4. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с. ил.

5. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева / Свенчанский А. Д., Жердев И. Т., Кручинин А. М. и др.; Под ред. Свенчанского А. Д. -2-е изд. Перераб. и доп.-М.: Энергоиздат, 1981.-296 с.