



Тверской государственный технический университет

Макаров Анатолий Николаевич



Заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» ТвГТУ, доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ

1978 г.

Окончил **Калининский политехнический институт** с квалификацией инженер-электрик

с 1979 г.

Учеба в аспирантуре

Выдвижение **гипотезы на научное открытие** закономерностей теплообмена электрической дуги в электрометаллургических печах

1982 г.

Защита **кандидатской диссертации** в Московском энергетическом институте

с 1983 г.

Теоретическое обоснование открытия, вывод формул для расчета теплообмена в электродуговых и плазменнодуговых сталеплавильных печах

1995 г.

Защита **докторской диссертации** «Теория теплообмена в электродуговых печах для плавки стали» в НИУ СПбГЭТУ

1996 г.

Открыты законы излучения газовых объемов факела в

2001 г.

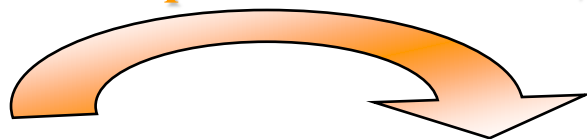
металлургических печах и энергетических установках

2001 г.

На основе открытых законов разработана современная теория

2010 г.

теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания, которая получила **экспериментальное подтверждение**



2010 – 2017 гг.

Апробация и практическое использование теоретических и экспериментальных работ учеными, инженерами многих университетов, научно-исследовательских институтов, промышленных предприятий, среди которых Московский энергетический институт, Санкт-Петербургский электротехнический университет, Московский институт стали и сплавов, ОАО «ЦНИИчермет», Институт металлургии РАН, ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», ОАО «Северсталь», ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» и другие.



С **1983 г.** на кафедре «Электротехники и электроснабжения промышленных предприятий» в Калининском политехническом институте

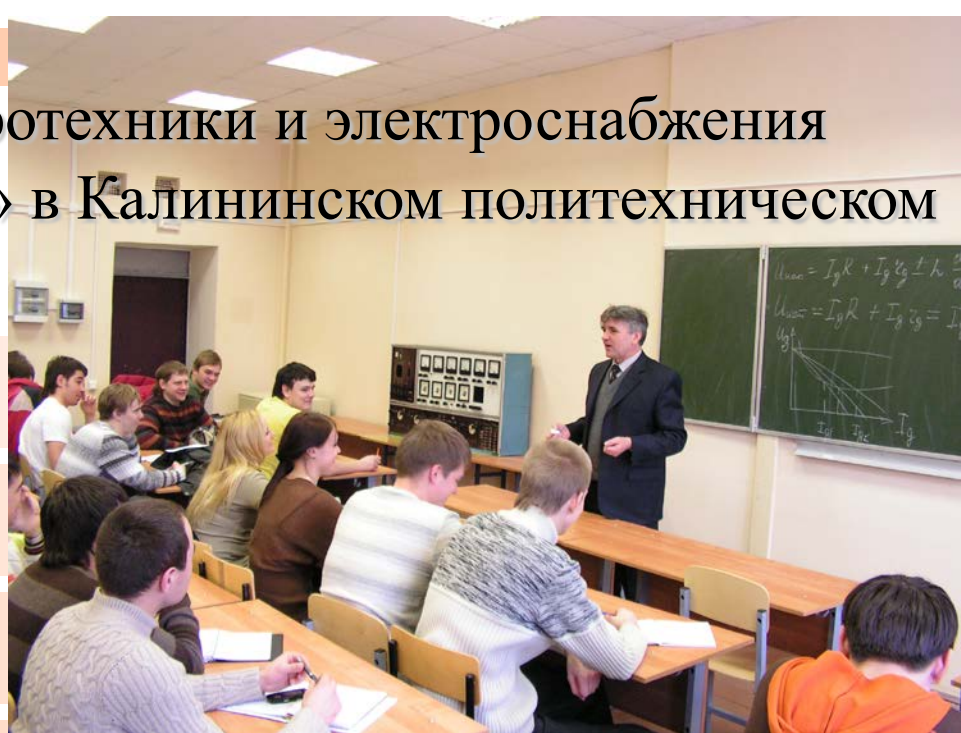
старший научный сотрудник

ассистент

старший преподаватель

доцент

профессор, заведующий кафедрой “Электроснабжение и электротехника”



С **1996 г.**

Прикладные научно-исследовательские работы в российских промышленных компаниях

ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И ФАКЕЛА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕПЛООБМЕНА в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания

Часть вторая
Теплообмен в факельных печах, топках, камерах сгорания



370 научных трудов

9 монографий

7 учебников

научное открытие

23 патента на изобретения



Зарегистрирован приоритет **научного открытия**


21.04.1983 – в части формулировки гипотезы

19.03.1987 – в части теоретического обоснования

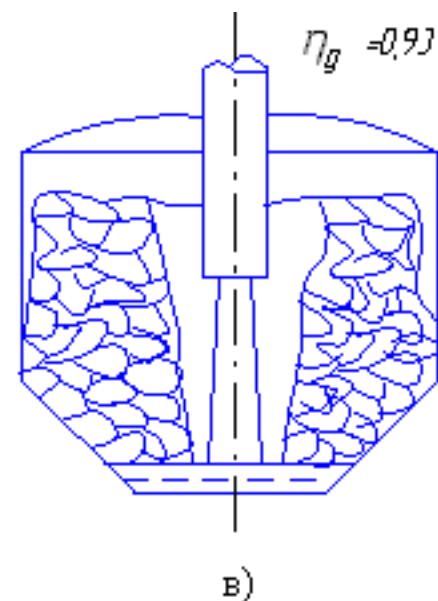
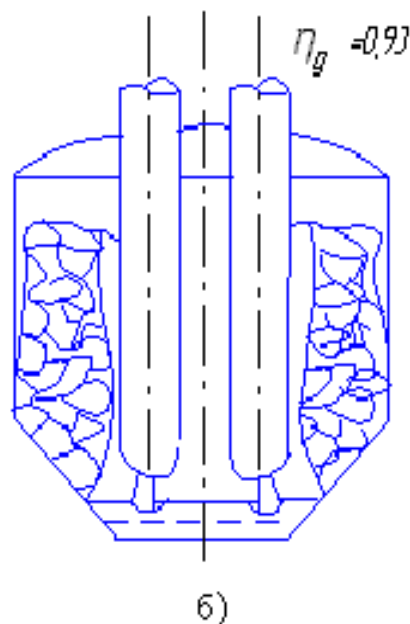
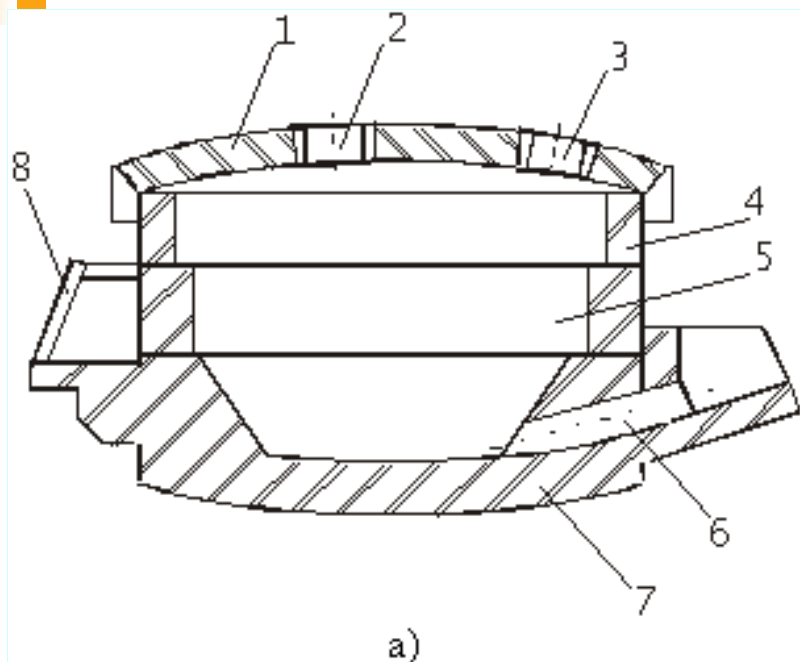
01.05.2001 – в части экспериментального подтверждения открытия.

ОАО «ЦНИИчермет» по заявке на научное открытие №А-522 от 14.10.2010 был выдан МААНОИ **диплом №417** на научное открытие.



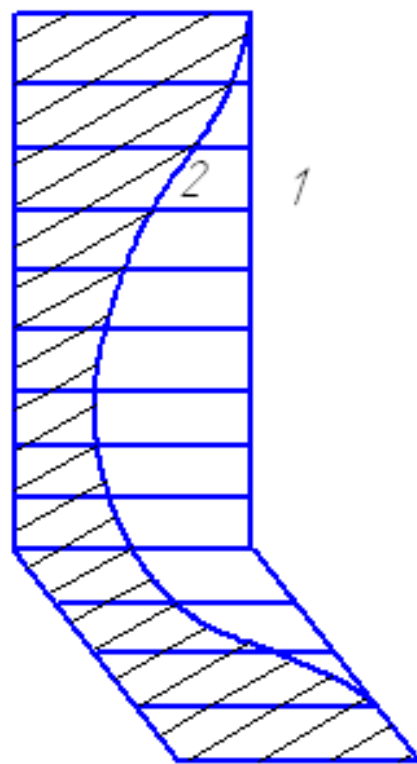


«Законы теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов, электрических дуг дуговых сталеплавильных печей и факелов нагревательных печей, топков паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок электростанций и влияние научного открытия на развитие металлургии и энергетики России»

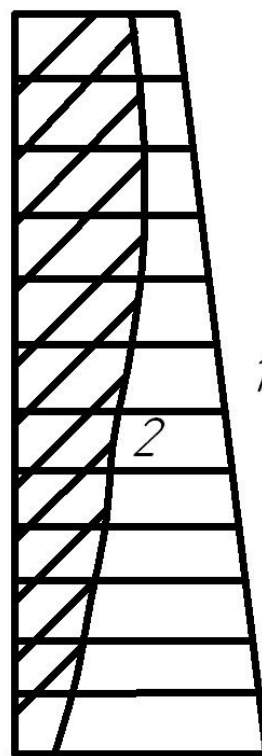


*Дуговая сталеплавильная печь с огнеупорной футеровкой (а)
и расплавление шихты в ДСПТТ (б) и ДСППТ (в):*

1 – футерованный свод; 2 – электродное отверстие; 3 – отверстие газоотсоса; 4 – футеровка стен; 5 – плавильное пространство; 6 – сливной желоб; 7 – футеровка пода; 8 – рабочее окно



а)

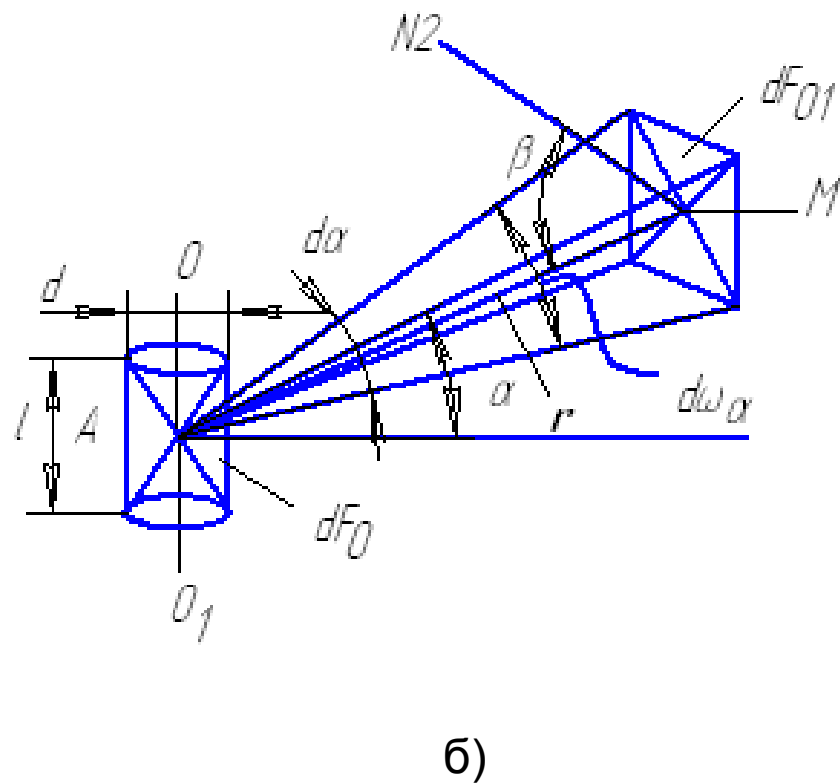
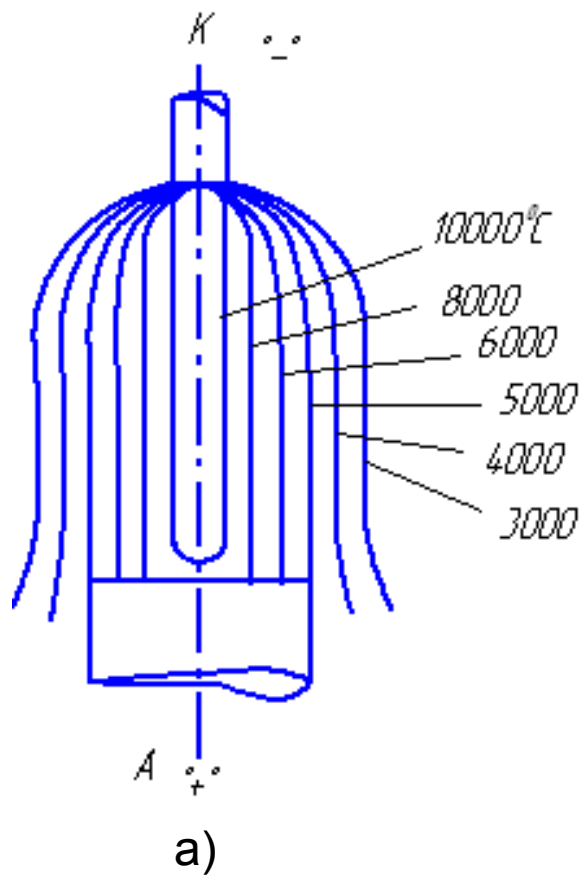


б)

Топографии износа футеровки стен ДСП-100 (а) и ДСП-3 (б)

1 – профиль кладки новых стен;

2 – профиль кладки в конце компании стен



Электрическая дуга (а) и моделирование
ее излучения излучением элементарного цилиндра (б)

Поток излучения элементарного цилиндра на dF_{01}

$$dQ_{\alpha} = I_{ON} \ell d \cos \alpha d\omega_{\alpha} = I_{oe} \cos \alpha d\omega_{\alpha}$$

Телесный угол

$$d\omega_{\alpha} = \frac{dF_{01} \cos \beta}{r^2}$$

Подставив (1) в (2) получим

$$dQ_{\alpha} = \frac{I_{oe} \cos \alpha \cos \beta dF_{01}}{r^2}$$

Плотность потока излучения цилиндра в т. М

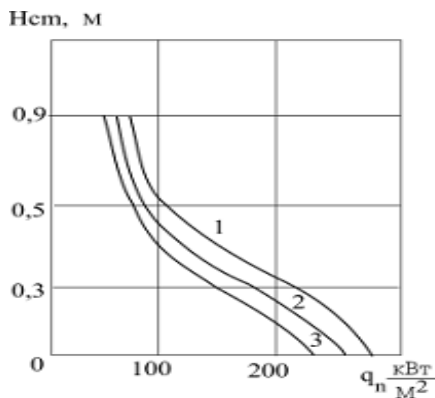
$$q_{\text{нц}} = \frac{Q_{\alpha}}{F_{01}} = \frac{I_{oe} \cos \alpha \cos \beta}{r^2}$$

Полный поток излучения элементарного цилиндра

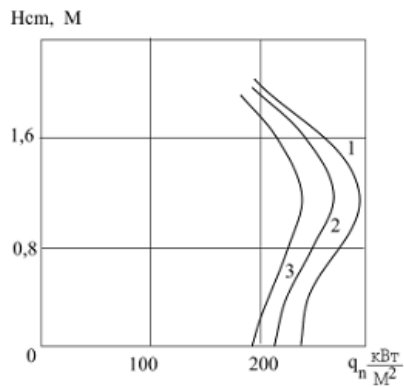
$$Q = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} 2\pi I_{oe} \cos^2 \alpha d\alpha = 2\pi I_{oe} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos^2 \alpha d\alpha = \pi^2 I_{oe}$$

$$q_{\text{нц}} = \frac{Q \cos \alpha \cos \beta}{\pi^2 r^2} \quad q_{\text{пд}} = \frac{0,9P_{\text{д}} \cos \alpha \cos \beta}{\pi^2 r^2 I_{\text{д}}} \quad I_{\text{отк}}$$

Распределение плотности потоков излучений, падающих от дуг и электродов по высоте стен ДСП-3 (а) и ДСП-100 (б)

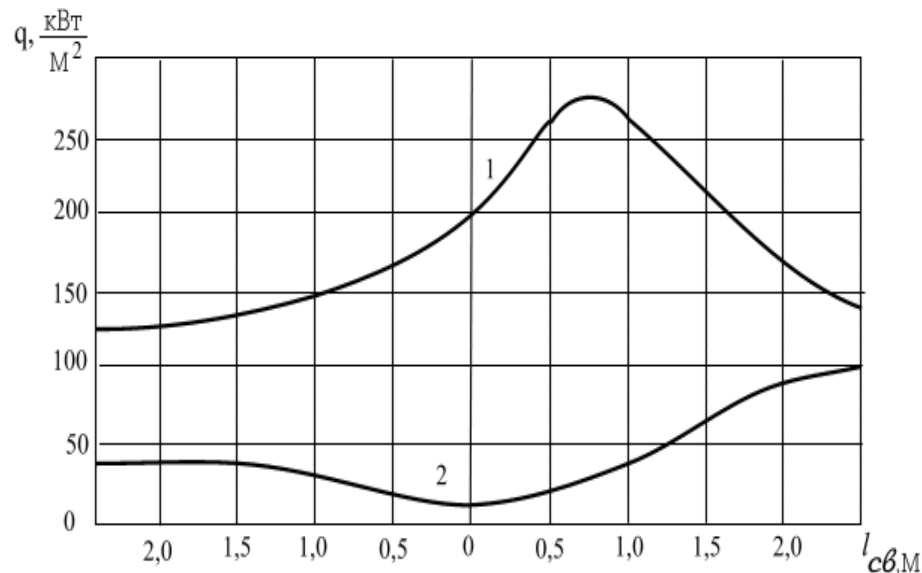


а)

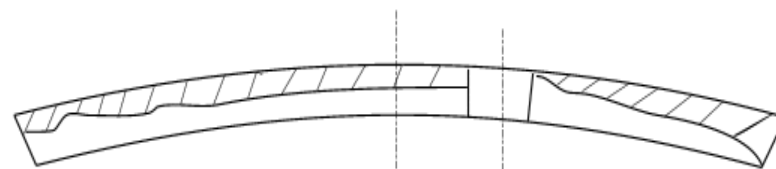


б)

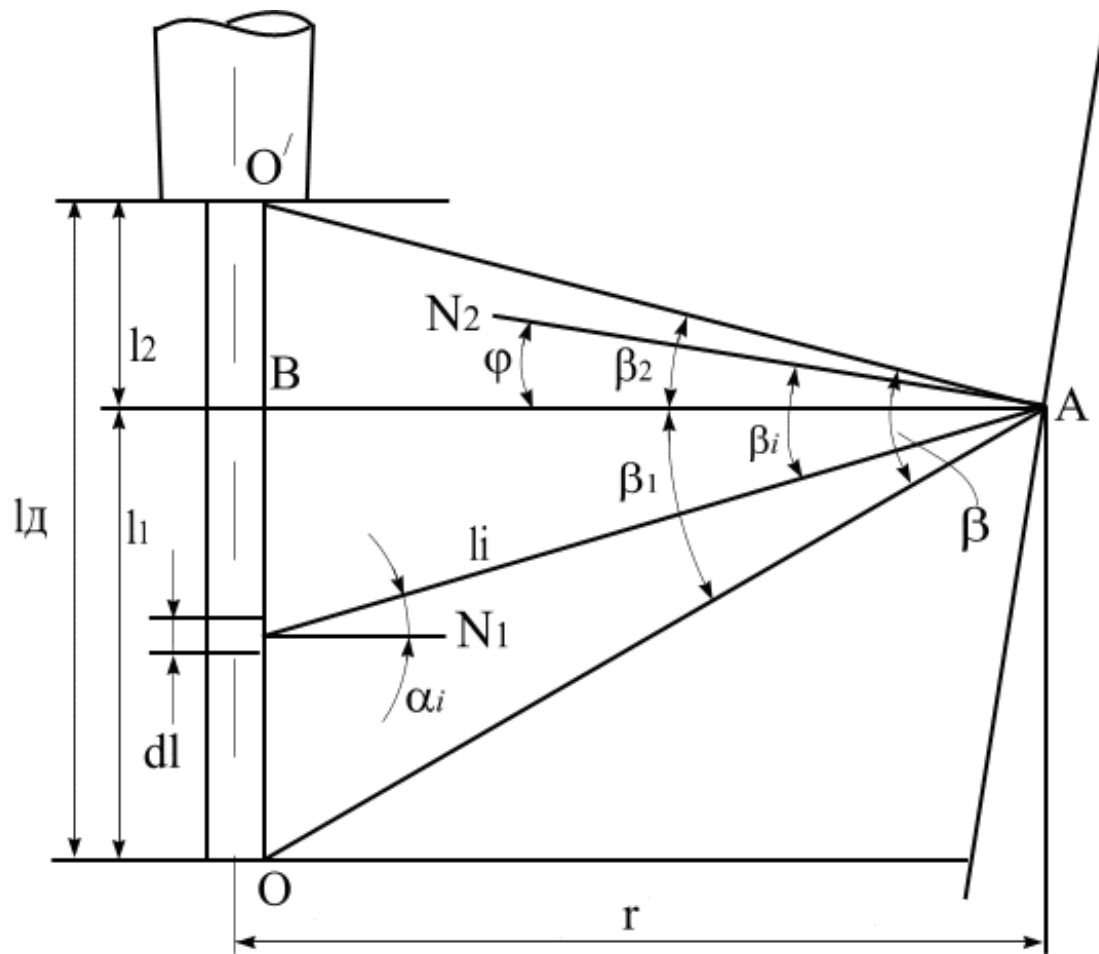
Распределение суммарных потоков излучений от дуг и электродов (а) и топография износа свода печи ДСП-50 (б)



а



б



*Излучение дуги на наклонные участки стен,
расположенные напротив дуги*

Плотность потока излучения, падающего в т.А определим интегрированием выражения (1) в пределах изменения угла α_i :

$$dq = \frac{\alpha_{изл} P_D \cos \alpha_i \cos \beta_i}{\pi^2 l_i^2 l_D} dl = \frac{\alpha_{изл} P_D \cos \alpha_i \cos \beta_i d\alpha}{\pi^2 r l_D} = \frac{\alpha_{изл} P_D}{\pi^2 r l_D} \left[\cos \alpha_{i1} (\cos \varphi \cos \alpha_{i1} - \sin \varphi \sin \alpha_{i1}) d\alpha_{i1} + \right. \\ \left. + \cos \alpha_{i2} (\cos \varphi \cos \alpha_{i2} + \sin \varphi \sin \alpha_{i2}) d\alpha_{i2} \right]$$

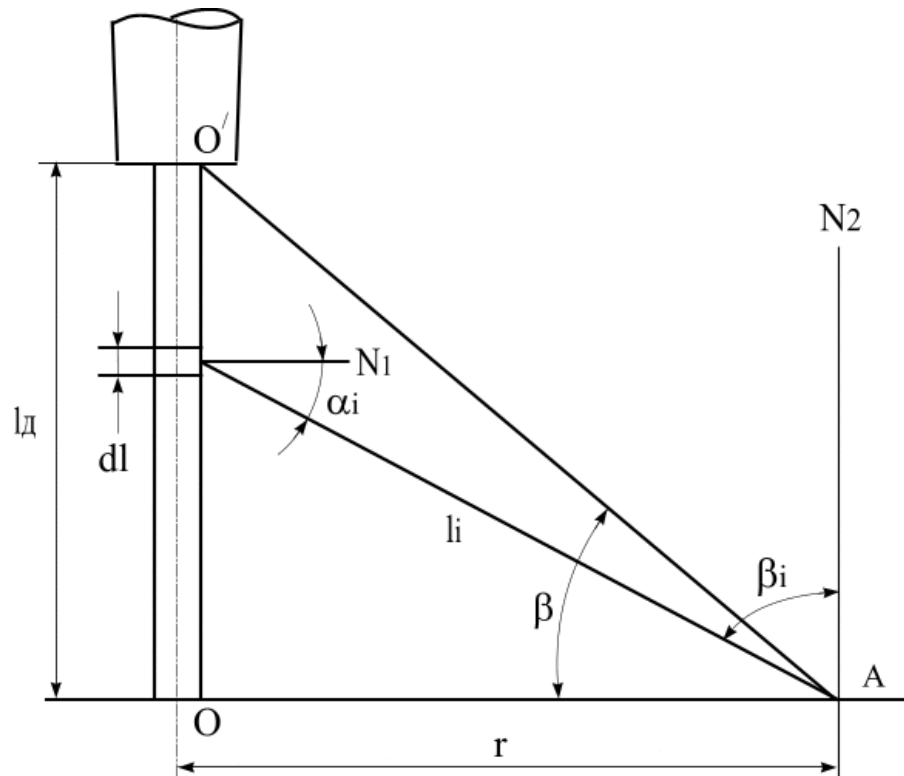
$$q = \frac{\alpha_{изл} P_D}{\pi^2 r l_D} \left[\int_0^{\beta_1} \cos \alpha_{i1} (\cos \varphi \cos \alpha_{i1} - \sin \varphi \sin \alpha_{i1}) d\alpha_{i1} + \right. \\ \left. + \int_0^{\beta_2} \cos \alpha_{i2} (\cos \varphi \cos \alpha_{i2} + \sin \varphi \sin \alpha_{i2}) d\alpha_{i2} \right]$$

Полный поток излучения элементарного цилиндра

$$q = \frac{\alpha_{изл} P_D}{\pi^2 r l_D} \int_0^{\beta_1} \cos \varphi \cos^2 \alpha_{i1} d\alpha_{i1} - \frac{\alpha_{изл} P_D}{\pi^2 r l_D} \int_0^{\beta_1} \sin \varphi \sin \alpha_{i1} \cos \alpha_{i1} d\alpha_{i1} + \\ + \frac{\alpha_{изл} P_D}{\pi^2 r l_D} \int_0^{\beta_2} \cos \varphi \cos^2 \alpha_{i2} d\alpha_{i2} + \frac{\alpha_{изл} P_D}{\pi^2 r l_D} \int_0^{\beta_2} \sin \varphi \sin \alpha_{i2} \cos \alpha_{i2} d\alpha_{i2} = \\ = \frac{\alpha_{изл} P_D \cos \varphi}{2\pi^2 r l_D} \left(\beta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right) + \frac{\alpha_{изл} P_D \sin \varphi}{2\pi^2 r l_D} \sin 2\beta_2 .$$

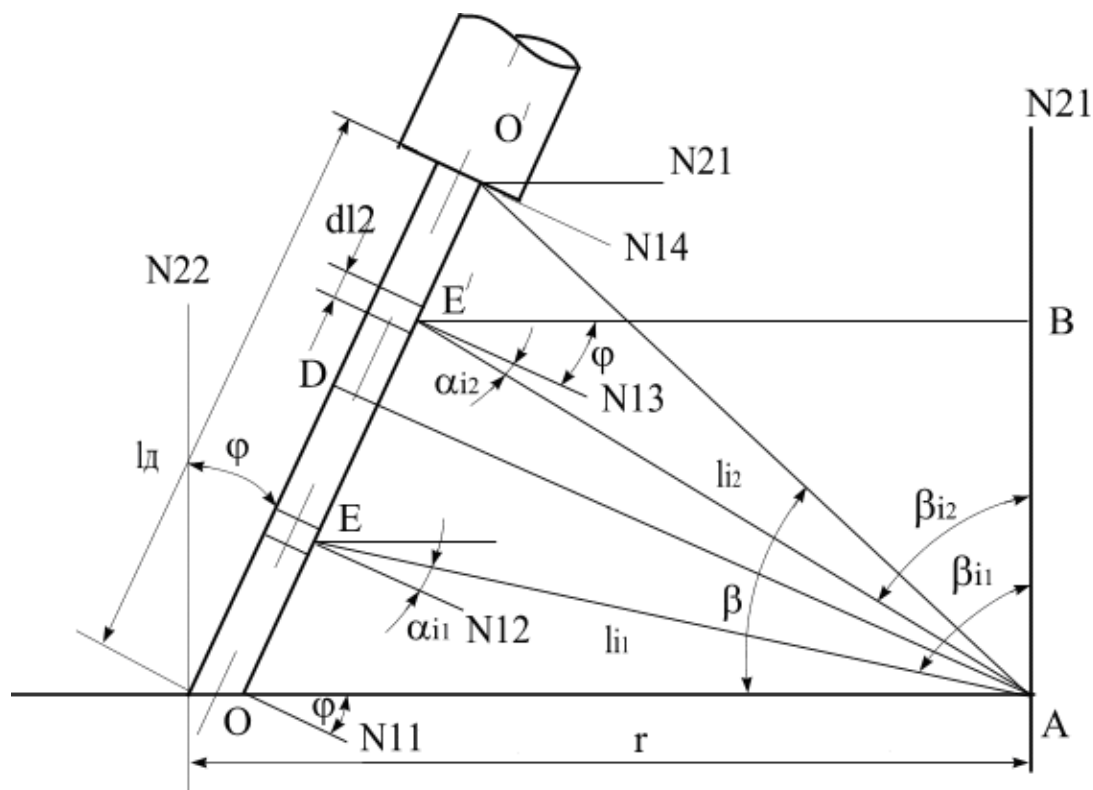
Так как $\beta_1 + \beta_2 = \beta$, а также $1/2 (\sin 2\beta_1 + \sin 2\beta_2) = \sin \beta \cos (\beta_1 - \beta_2)$, то выражение (2) принимает вид:

$$q = \frac{\alpha_{изл} P_D}{2\pi^2 r l_D} \left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos (\beta_1 - \beta_2)] - \\ - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \end{array} \right\}$$



Излучение дуги сводового плазмотрона на ванну металла

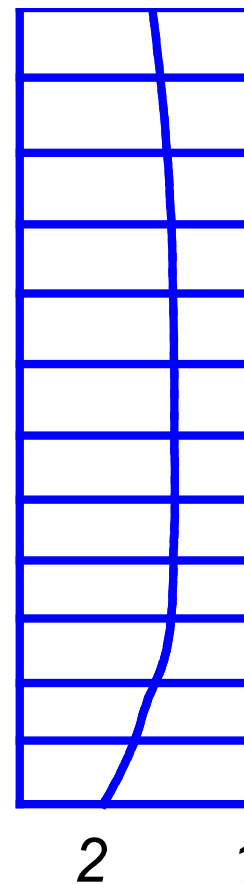
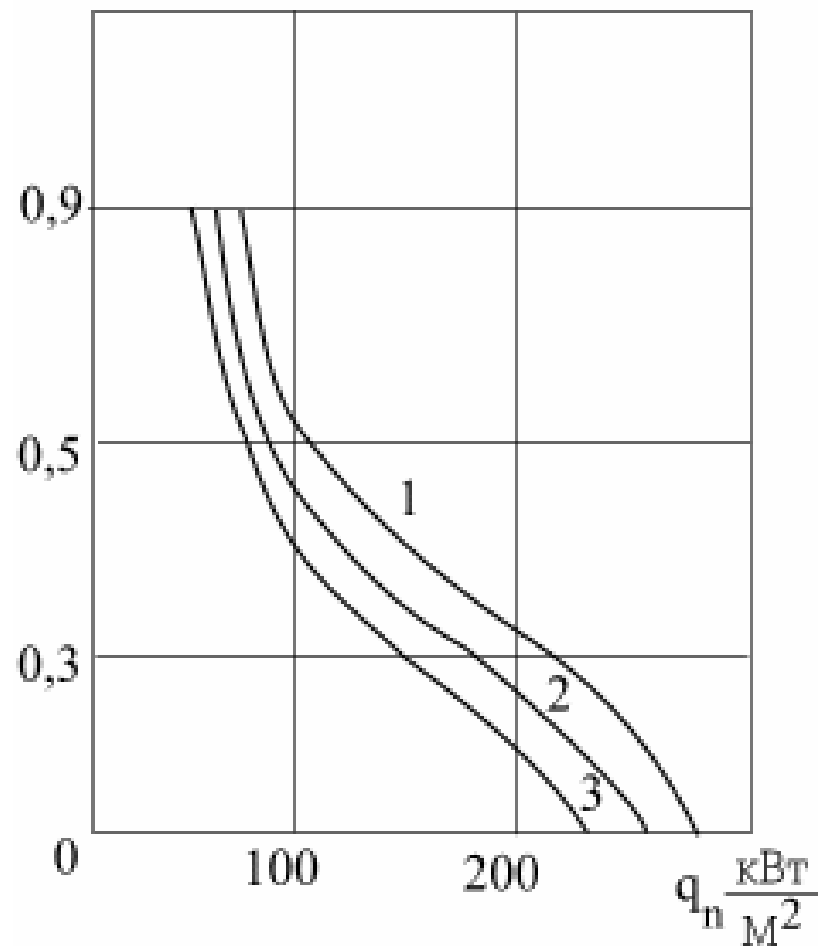
$$\begin{aligned}
 q &= \int_0^{\beta} \frac{\alpha_{\text{изл}} P_D}{\pi^2 r l_D} \cos \alpha_i \sin \alpha_i d\alpha = \\
 &= \frac{\alpha_{\text{изл}} P_D}{\pi^2 r l_D} \int_0^{\beta} \cos \alpha_i \sin \alpha_i d\alpha = \frac{\alpha_{\text{изл}} P_D}{2\pi^2 r l_D} \sin^2 \beta.
 \end{aligned}$$



Излучение дуги стенового плазмотрона на участки ванны, расположенные между столбом дуги и откосами

$$q = \frac{\alpha_{изл} P_D}{2\pi^2 r l_D} \left\{ \left[\sin^2(\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi \right] + \right. \\ \left. + \operatorname{tg} \varphi \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta - 2\varphi) \right] \right\}$$

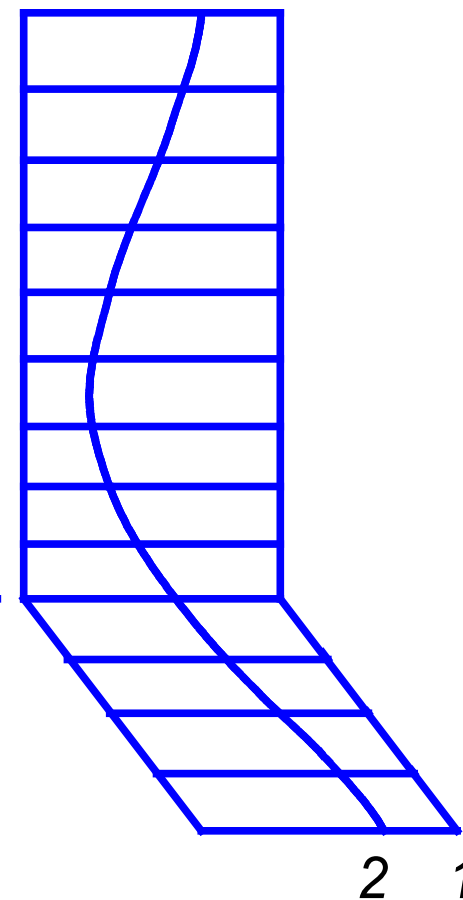
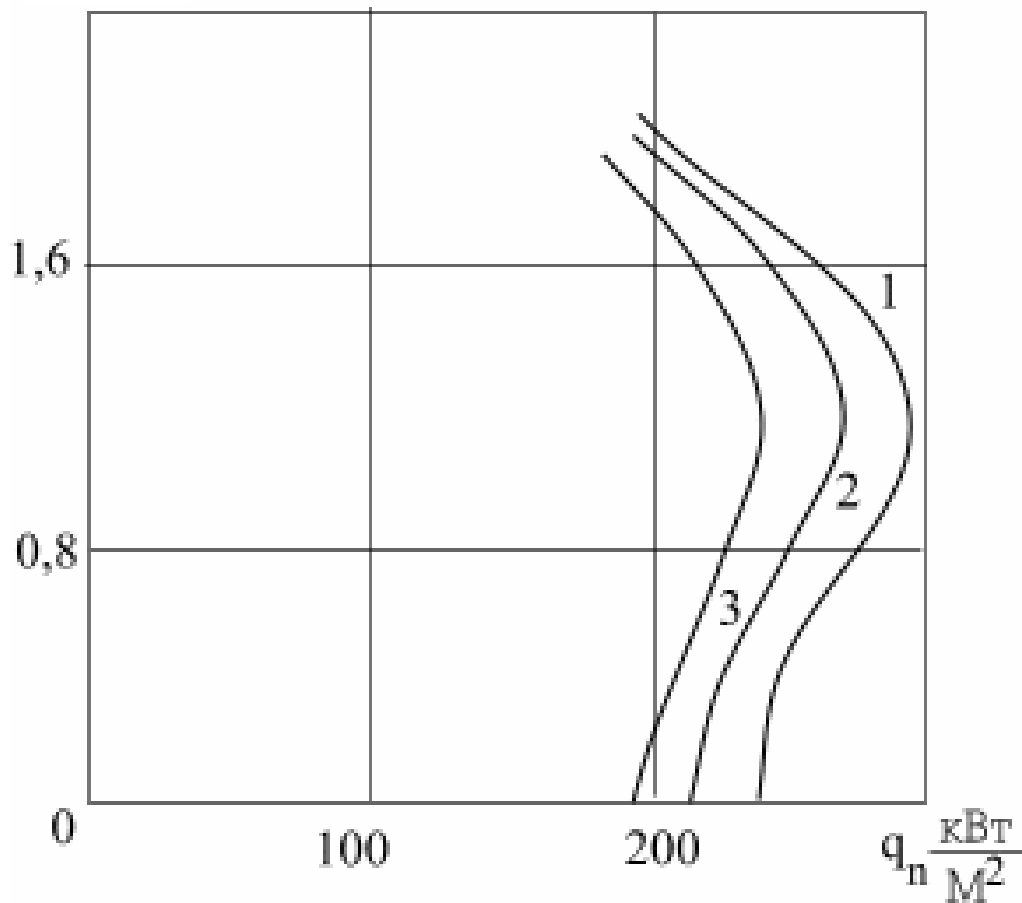
НСТ, м



Распределение плотности потоков излучения, падающих от дуг и электродов по высоте стен в первой (1), второй (2) и третьей (3) зонах печей ДСП-3 и топография износа стен

1 – профиль кладки новых стен; 2 – профиль кладки в середине компании стен

Нст, м



Распределение плотности потоков излучения, падающих от дуг и электродов по высоте стен в первой (1), второй (2) и третьей (3) зонах печей ДСП–100 и топография износа стен

1 – профиль кладки новых стен; 2 – профиль кладки в конце компании стен

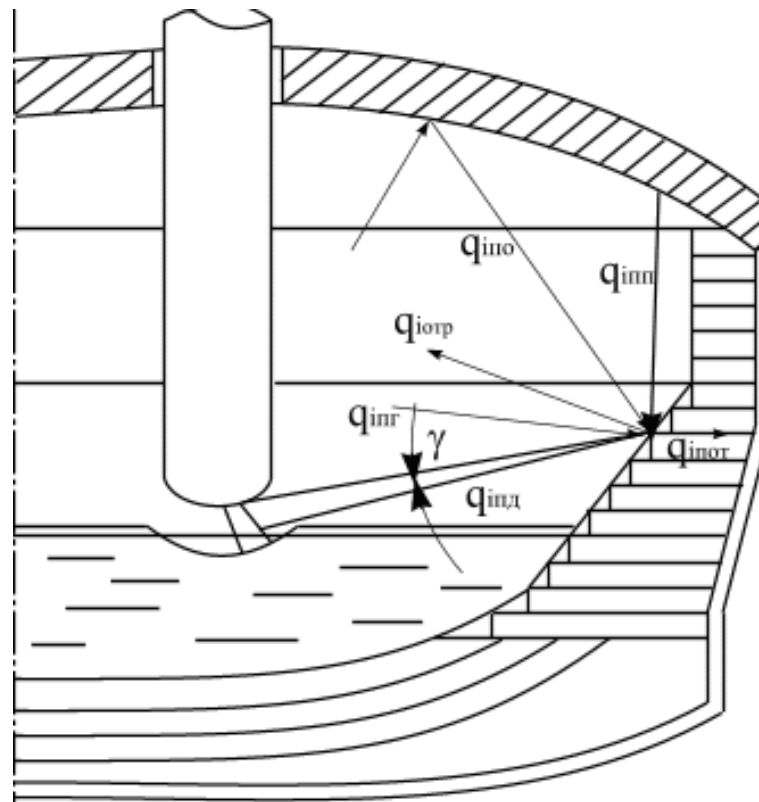


Схема теплообмена в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока

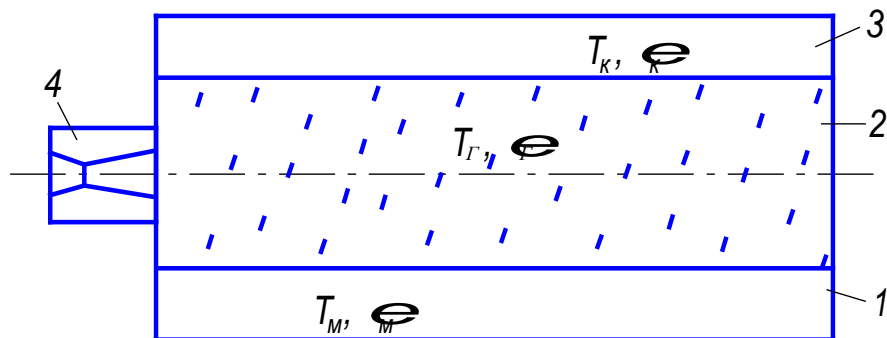
$$q_{in} = q_{inд} + q_{ino} + q_{inп} + q_{inэ} + q_{inг}$$

Результирующий поток излучения на металл

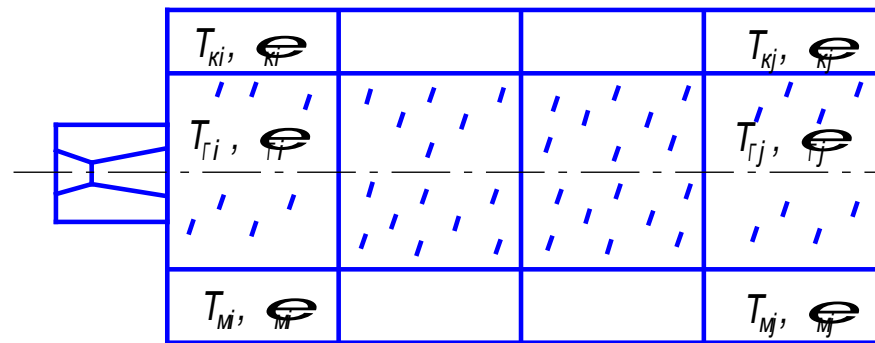
$$q_{pm} = c_{gkm} \left| \left(T_z / 100 \right)^4 - \left(T_m / 100 \right)^4 \right|$$

Мощность факела

$$P_{\phi} = Q_H^p V_K + Q_{\phi B} V_B$$

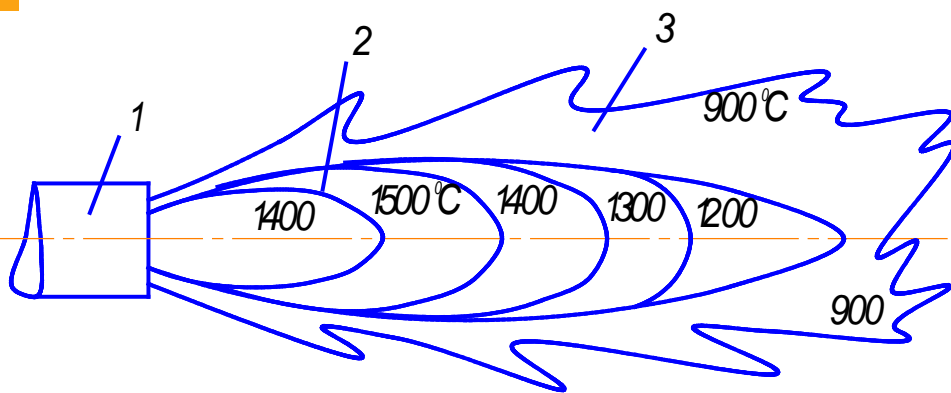


а)

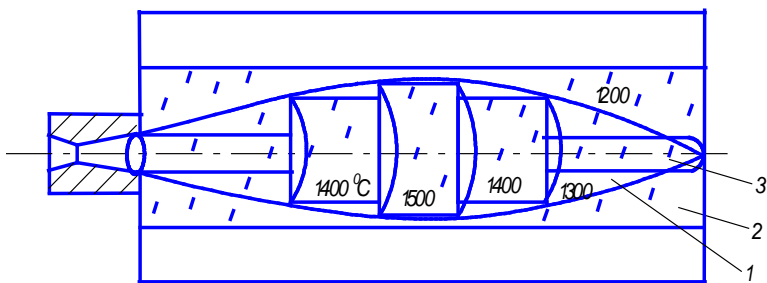


б)

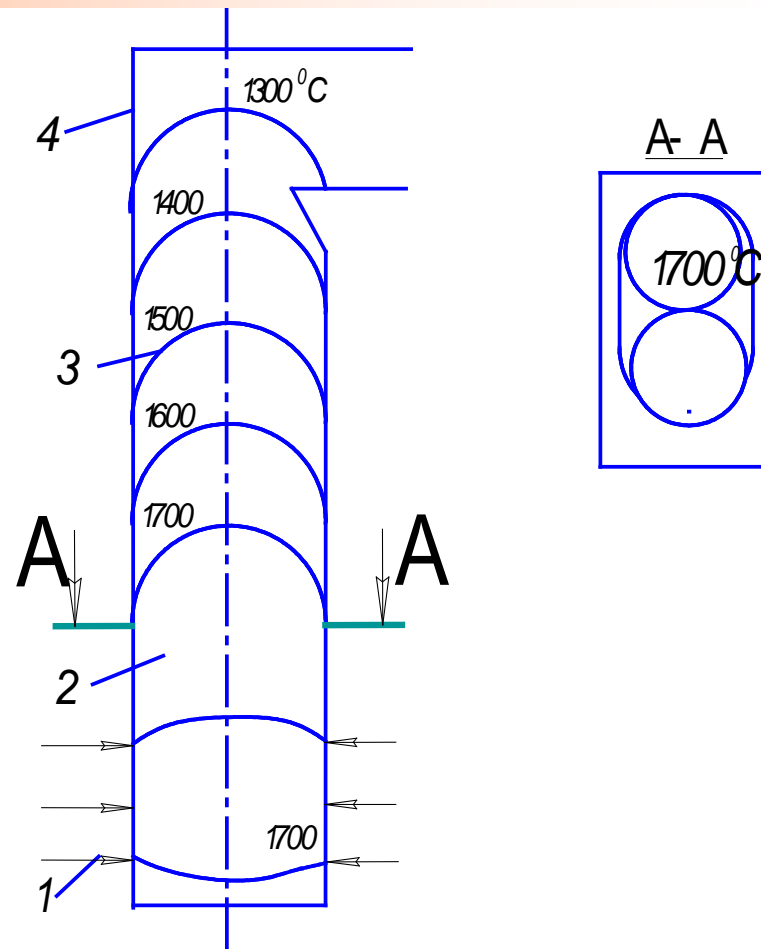
Моделирование факела изотермическим газом (а) и
прямоугольными параллелепипедами (б)
в факельных печах



а)

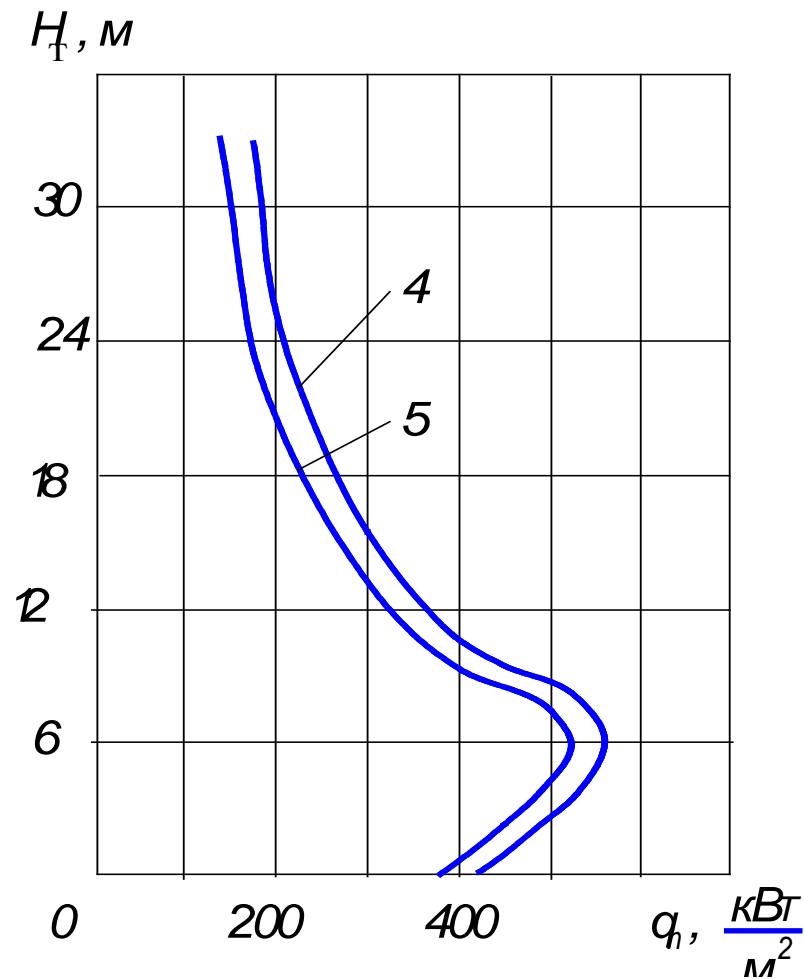


б)



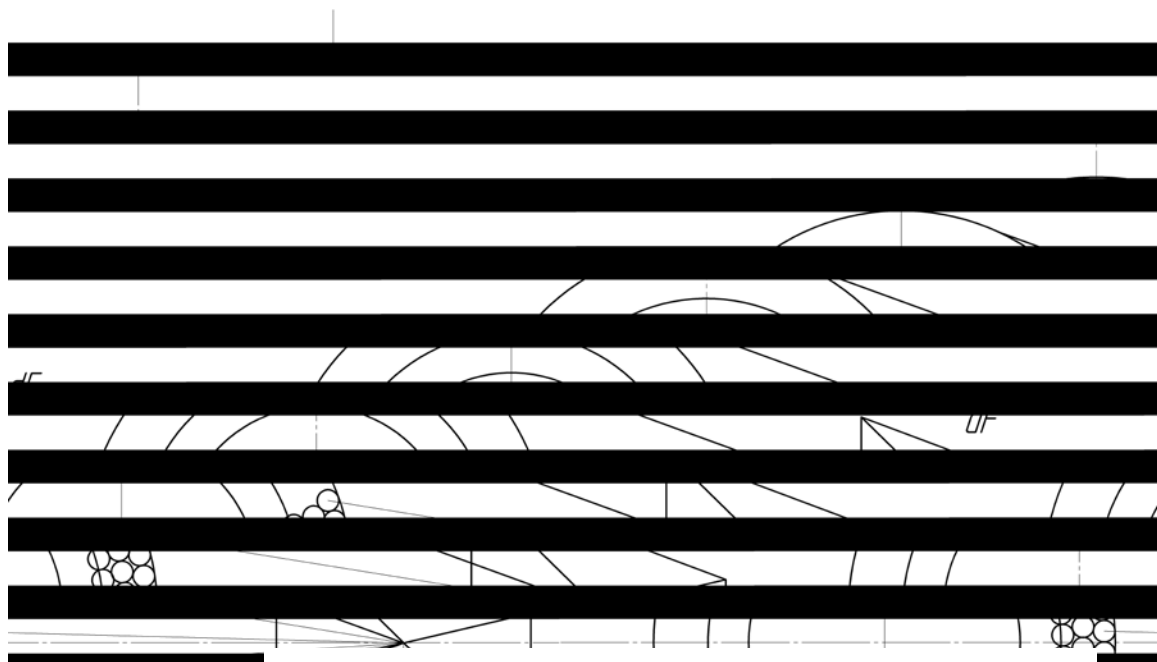
Форма (а) и геометрическая модель факела (б)

Факел в точке парового котла

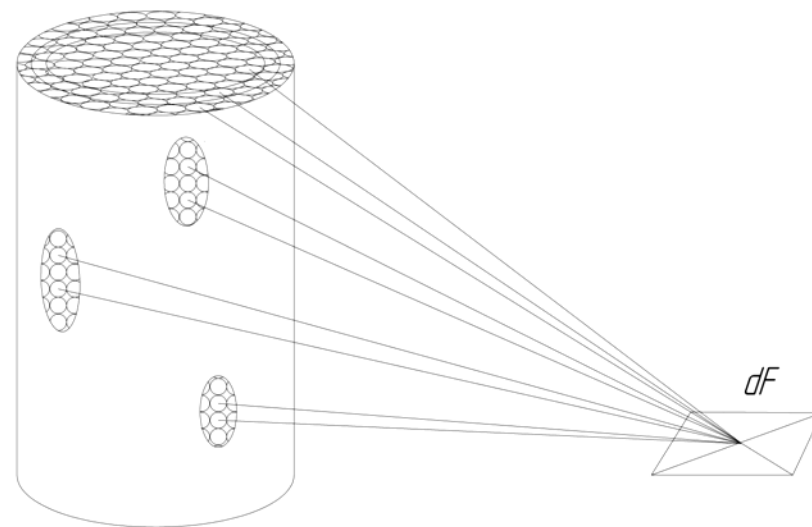


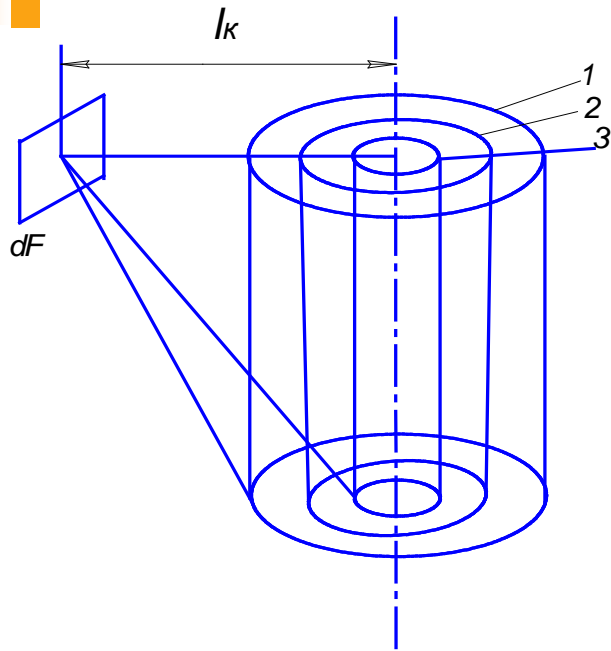
Распределение плотности интегрального потока падающего излучения по высоте точки котла ТГМП-314 при встречном расположении горелок

*Излучение изотермических
изохорных концентричных
сферических газовых
объемов на расчетную
площадку dF .*



*Излучение изотермических
изохорных коаксиальных газовых
объемов на расчетную площадку
 dF .*





*Излучение изотермических
коаксиальных цилиндрических
газовых ионизированных
и неионизированных слоев*

*I. Элементарные угловые коэффициенты излучения
коаксиальных цилиндрических газовых объемов на площадку dF :*

$$\varphi_{F_1 dF} = \frac{\varphi_{dFF_1} F_{dF}}{F_1} = \frac{0,23 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 4,8 \cdot 10} = 0,0003815 \quad (1)$$

$$\varphi_{F_2 dF} = \frac{\varphi_{dFF_2} F_{dF}}{F_2} = \frac{0,188 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 3,92 \cdot 10} = 0,0003815 \quad (2)$$

$$\varphi_{F_3 dF} = \frac{\varphi_{dFF_3} F_{dF}}{F_3} = \frac{0,133 \cdot 0,25}{3,14 \cdot 2,78 \cdot 10} = 0,0003815 \quad (3)$$

II. Плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов:

$$\begin{aligned} q_{F_1 dF} = q_{F_2 dF} = q_{F_3 dF} &= \frac{\varphi_{F_1 dF} \cdot P_1}{F_{dF}} e^{-kl_1} = \frac{\varphi_{F_2 dF} \cdot P_2}{F_{dF}} e^{-kl_2} = \frac{\varphi_{F_3 dF} P_3}{F_{dF}} e^{-kl_3} = \\ &= \frac{0,0003815 \cdot 233,3 \cdot 10^3}{0,25} e^{-0,15 \cdot 7,8} = 110 \text{ кВт/м}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$q_{FdF} = \sum_{i=1}^3 q_{F_i dF} = 330 \text{ кВт/м}^2 \quad (5)$$

III. Средняя длина пути лучей 1 – 3 коаксиальных цилиндрических газовых объемов

$$l_1 = l_2 = l_3 = l \quad (6)$$

IV. Плотность потоков излучений, падающих от трех коаксиальных цилиндрических газовых объемов на dF :

Плотность потока излучения третьего цилиндрического газового объема на dF :

$$q_{F_3, dF} = \frac{\varphi_{F_3, dF} \cdot P_3 \cdot e^{-kl_3}}{F_{dF}} = \frac{0,0003815 \cdot 700 \cdot 10^3}{0,25} e^{-0,15 \cdot 7,8} = 330 \text{ кВт/м}^2. \quad (7)$$

V. При моделировании факела изотермическими коаксиальными цилиндрическими газовыми слоями и расчета теплообмена излучением результаты вычислений включают в себя объемное излучение и поглощение всех слоев факела и их теплообмен со всеми поверхностями нагрева. Плотность теплового потока, падающего на расчетную площадку на поверхности нагрева

$$q_{iП} = q_{iП.ф} + q_{iП.о.ф} + q_{iП.п} + q_{iП.о.п} + q_{iПсг} \quad (8)$$

Математическая запись законов следующая.

$$q_{FdF} = \frac{\varphi_{F_0dF} \cdot P_F \cdot e^{-kl}}{F_0}$$

$$l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_i = \left(\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \right) = l$$

$$\varphi_{F_1dF} = \varphi_{F_2dF} = \varphi_{F_3dF} = \dots = \varphi_{F_idF}$$

$$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF} = \dots = q_{F_idF}$$

$$q_{F_1dF} = \sum_{i=1}^n q_{F_idF}$$

Математическая запись законов теплового излучения газовых объемов, законов Макарова, наглядна обоснована аналогично формулировке и математической записи третьего закона Ньютона в учебниках физики для учащихся средних школ и студентов технических университетов: «Тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по значению».

$$F_1 = -F_2$$

где F_1 – сила, с которой тело 1 действует на тело 2; F_2 – сила, с которой тело 2 действует на тело 1. Законы теплового излучения газовых объемов аналогично фундаментальным законам физики обладают компактностью, точностью описания физического явления. Например, фундаментальный закон физики, закон Ома, характеризует соотношение между током I , протекающим в проводнике, напряжением U , приложенным к проводнику, и сопротивлением проводника R :

$$I = \frac{U}{R}$$

Аналогично закону Ома закон теплового излучения газовых объемов характеризует зависимость плотности потока теплового излучения q газового объема от углового коэффициента излучения φ , мощности излучения P , средней длины пути лучей l , коэффициента поглощения k газового объема. Для расчета параметров теплового излучения газовых объемов (2) φ , P , l автором выведены аналитические выражения, формулы.

Слагаемые в выражении (8) определяем по следующим формулам:

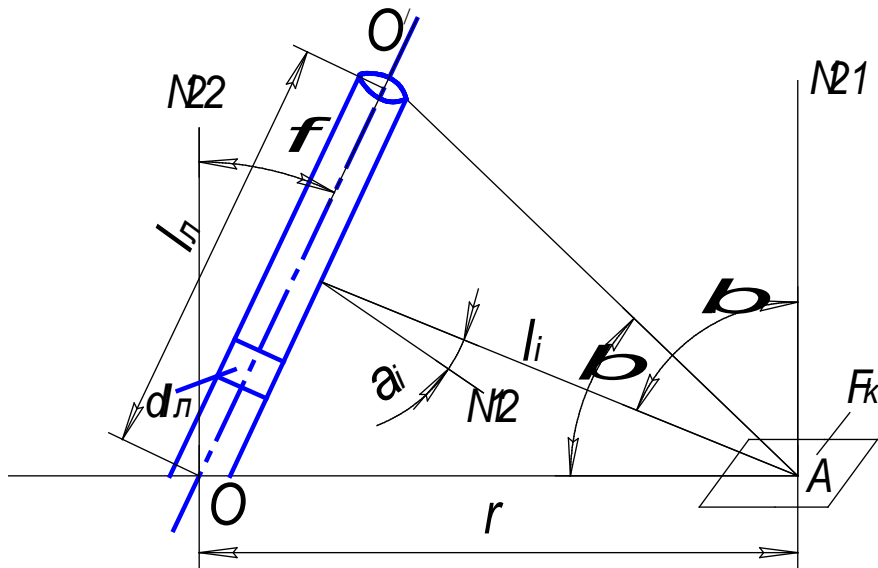
$$q_{iп.ф} = \sum_1^n \frac{\varphi_{\phi ji} P_{\phi j}}{F_i} e^{-kl}$$

$$q_{iп.о.ф} = \sum_1^n \frac{P_{\phi j} (\psi_{\phi jk} - \varphi_{\phi jk} e^{-kS})}{F_k}$$

$$q_{iп.п.} = \sum_1^n \frac{\varphi_{ji} Q_{jc}}{F_i} e^{-kl}$$

$$q_{iп.о.п.} = \sum_1^n \frac{Q_{jc} (\psi_{jk} - \varphi_{jk} e^{-\kappa S})}{F_k}$$

$$q_{iпсг} = \alpha (t_{г.ср} - t_{к})$$



*Излучение
цилиндрического
объема
на расчетную
площадку*

Элементарный угловой коэффициент излучения элементарного цилиндра

$$d\varphi_{ik} = \cos \alpha_i \cos \beta_i F_k dl_{\pi} / (\pi^2 l_i^2 l_{\pi}) \quad (1)$$

Из теоремы синусов и рис. 1 можно записать:

$$l_i = [r \sin(\pi/2 - \varphi)] / [\sin(\pi/2 + \alpha_i)]; \quad (2)$$

$$\cos \beta_i = \sin(\varphi - \alpha_i); \quad (3)$$

$$dl \cos \alpha_i = l_i d\alpha. \quad (4)$$

$$\varphi_{ik} = \int_0^{\varphi} [F_k \sin(\varphi - \alpha_{i1}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i1}) d\alpha_i] : [\pi^2 r l_{\pi} \sin(\pi/2 - \varphi)] +$$

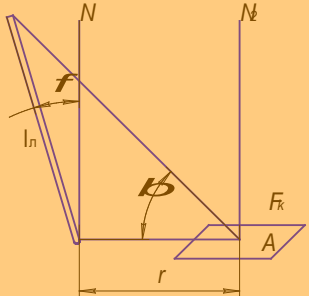
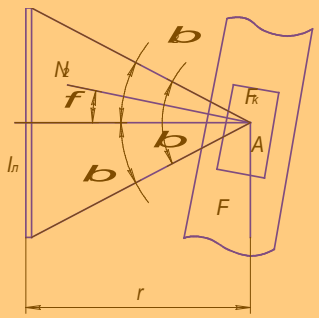
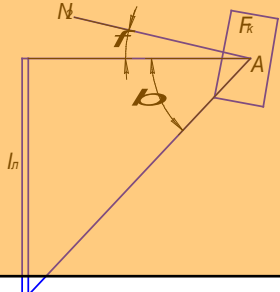
$$\int_0^{\beta - \varphi} [F_k \sin(\varphi + \alpha_{i2}) \sin(\pi/2 - \alpha_{i2}) d\alpha_2] : [\pi^2 r l_{\pi} \sin(\pi/2 - \varphi)] = \quad (5)$$

$$\left[F_k / (2\pi^2 r l_{\pi}) \right] \left\{ \left[\sin^2(\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi \right] + \operatorname{tg} \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta - 2\varphi)] \right\}.$$

Аналогичным образом получаем 13 аналитических выражений для расчета локальных угловых коэффициентов излучения цилиндрических объемов на расчетные площадки при их любом пространственном взаиморасположении.

$$\begin{aligned} \varphi_{lk} &= \int_0^{\varphi} \frac{F_k \sin(\varphi - \alpha_{i1}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i1}) d\alpha_{i1}}{\pi^2 r \ell_l \sin(\pi/2 - \varphi)} + \\ &+ \int_0^{\beta - \varphi} \frac{F_k \sin(\varphi + \alpha_{i2}) \sin(\pi/2 - \alpha_{i2}) d\alpha_{i2}}{\pi^2 r \ell_l \sin(\pi/2 - \varphi)} = \\ &= \frac{F_k}{2\pi^2 r \ell_l} \left\{ \left[\sin^2(\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi \right] + \operatorname{tg} \varphi \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta - 2\varphi) \right] \right\} . \end{aligned}$$

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r \ell_l} \left\{ \left[\sin^2(\beta - 0^0) - \sin^2 0^0 \right] + \operatorname{tg} 0^0 \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta - 2 \cdot 0^0) \right] \right\} = \frac{F_k}{2\pi^2 r \ell_l} \sin^2 \beta .$$

№ п/п	Схема взаимного расположения цилиндра и поверхности нагрева	Описание взаимного расположения цилиндра и поверхности нагрева	Локальный угловой коэффициент излучения цилиндра на площадку
1	2	3	4
1		<p>Элементарная площадка, находящаяся на горизонтальной плоскости, цилиндр, образующая с горизонтальной плоскостью острый угол</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \times \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) - \sin \varphi \sin^2 \beta \right]$
2		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси, напротив цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \left\{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}$
3		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси; центр площадки находится напротив верхнего среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \left\{ [\sin^2(\varphi + \beta) - \sin^2 \varphi] - \operatorname{tg} \varphi [\beta + \cos(2\varphi + \beta) \sin \beta] \right\}$

4		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси; центр площадки находится напротив нижнего среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \times \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) + \sin \varphi \sin^2 \beta \right]$
5		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси выше верхнего среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)] - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \}$
6		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной влево от вертикальной оси, напротив цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] + \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \}$
7		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной влево от вертикальной оси, выше среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)] + \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \}$

8		<p>Элементарная площадка, находящаяся на горизонтальной плоскости, и цилиндр, образующий с горизонтальной плоскостью острый угол</p>	$\varphi_{lk} = F_k / (2\pi^2 r l_n) \times \left\{ \left[\sin^2(\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi \right] + \operatorname{tg} \varphi [\beta + \cos(\beta - 2\varphi) \times \sin \beta] \right\}$
9		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимопараллельных плоскостях, элементарная площадка – напротив дуги</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \times [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)]$
10		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимопараллельных плоскостях, нормаль к элементарной площадке проходит через нижнее или верхнее основание цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_n} \times (\beta + 0,5 \sin 2\beta)$

11		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимопараллельных плоскостях, элементарная площадка находится на произвольной высоте</p>	$\varphi_{l\kappa} = \frac{F_{\kappa}}{2\pi^2 r l_n} \times [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)]$
12		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-перпендикулярных плоскостях, плоскость, на которой расположена элементарная площадка, проходит через основание дуги</p>	$\varphi_{l\kappa} = \int_0^{\beta_1} \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i F_{\kappa}}{\pi^2 r l_n} d\alpha = \frac{F_{\kappa}}{2\pi^2 r l_n} \sin^2 \beta$
13		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-перпендикулярных плоскостях, элементарная площадка находится на произвольной высоте</p>	$\varphi_{lk} = \int_{\beta_2}^{\beta_1} \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i F_{\kappa}}{\pi^2 r l_n} d\alpha = \frac{F_{\kappa}}{2\pi^2 r l_n} (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2)$

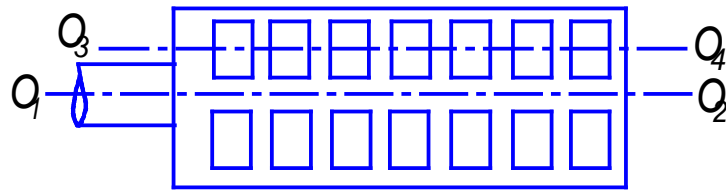
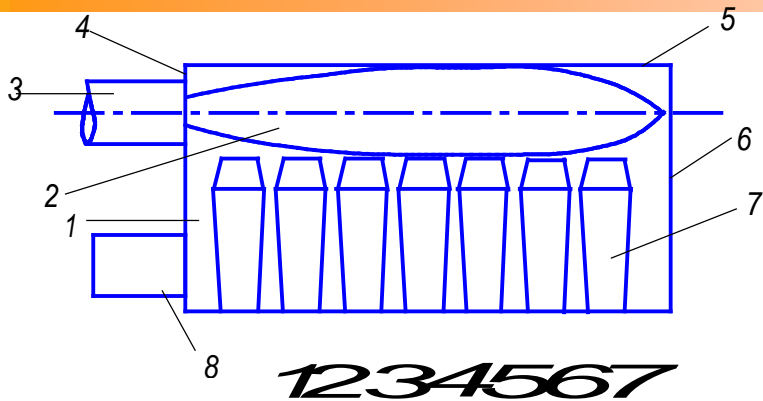
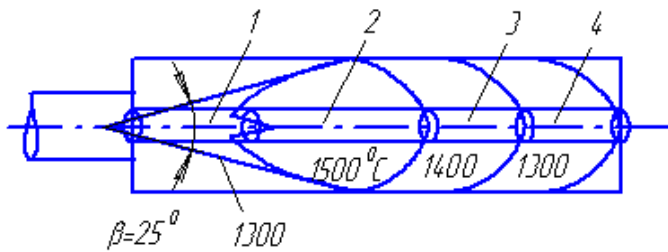
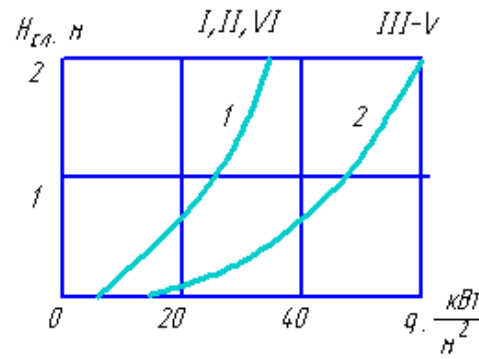


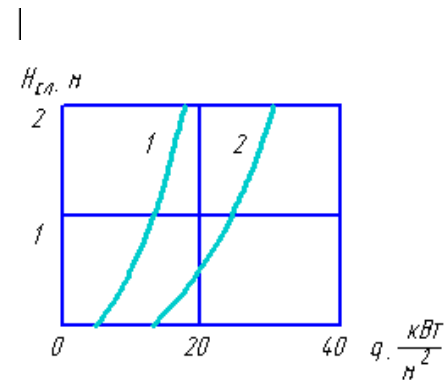
Схема рабочего пространства нагревательного колодца и размещения слитков в нем:
I – VII – номера рядов слитков



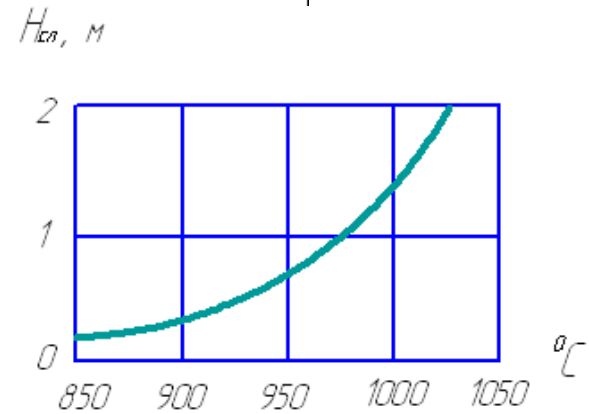
Распределение изотерм в факеле с углом раскрытия $\beta = 250$



а)



б)



в)

Распределение тепловых потоков в боковой поверхности слитков, обращенной к поверхности стен (а), к оси O1O2 (б), изменение температуры по высоте слитков на расстоянии 80 мм от поверхности (в)

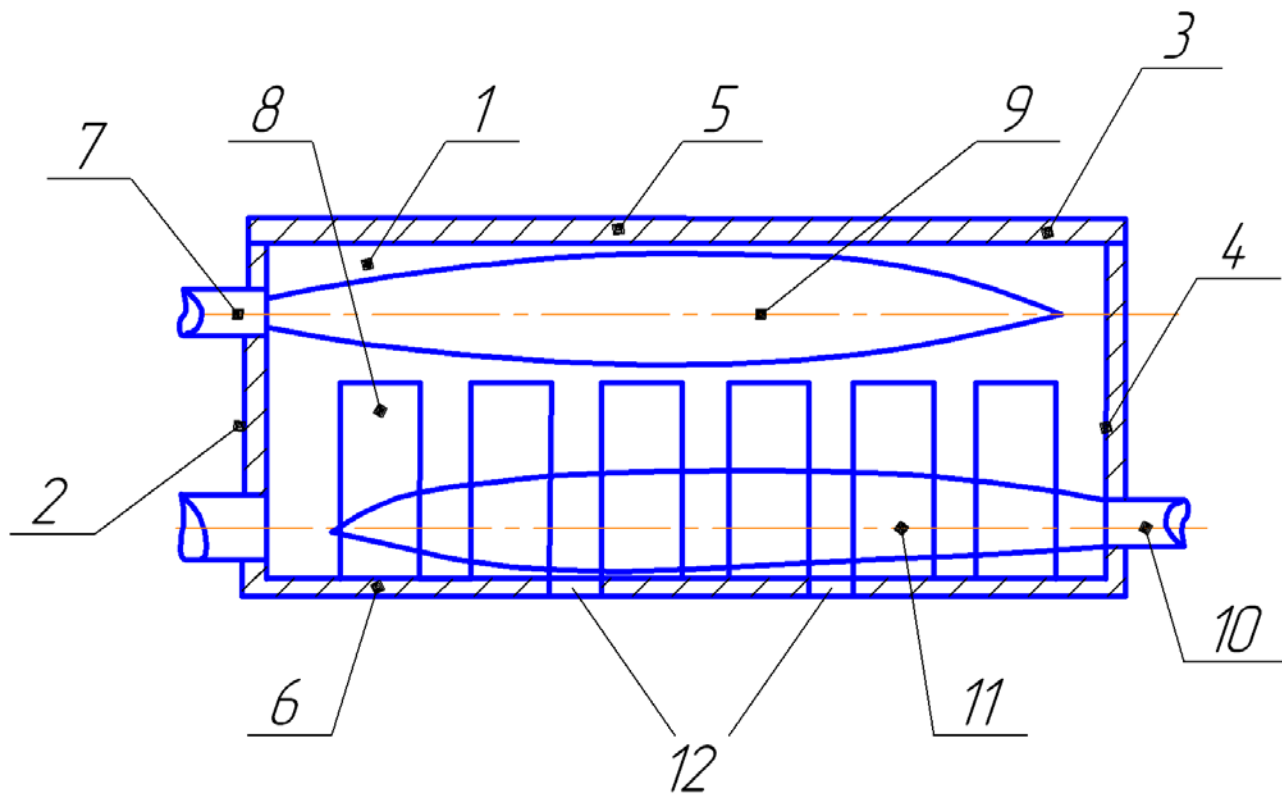


Схема рекуперативного нагревательного колодца с двумя факелам

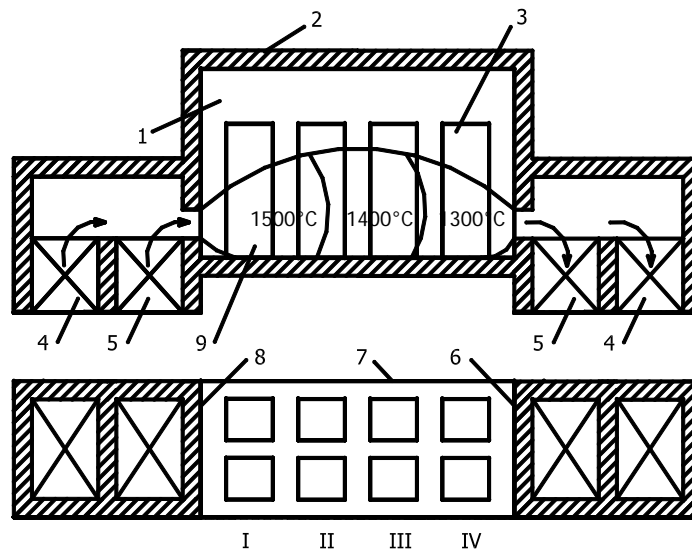
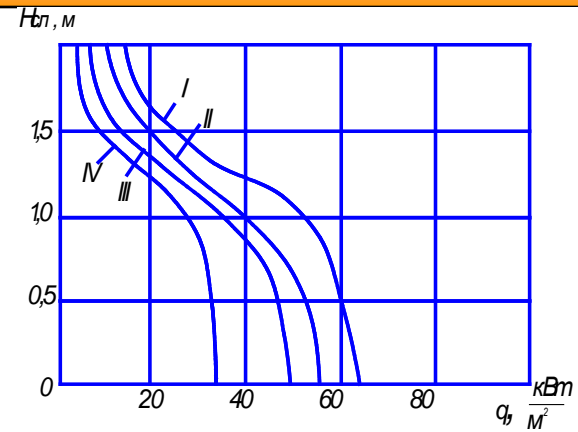
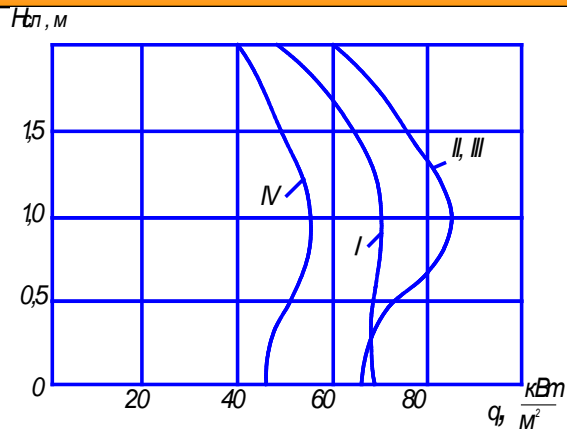
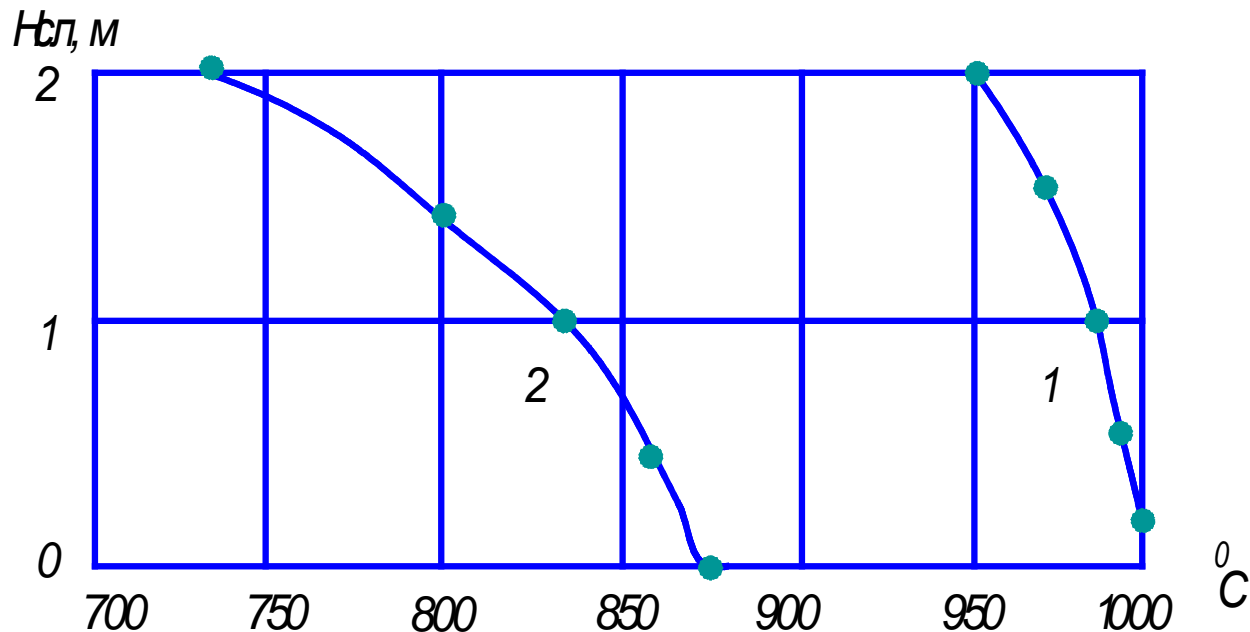


Схема регенеративного нагревательного колодца



Распределение по высоте слитков интегральных тепловых потоков, падающих на боковые поверхности, обращенные к боковой стене колодца (а) и к продольной оси симметрии колодца (б)



Изменение температуры по высоте боковой поверхности слитков, обращенной к стене колодца (1) и к продольной оси симметрии колодца (2) через 3 часа от начала нагрева

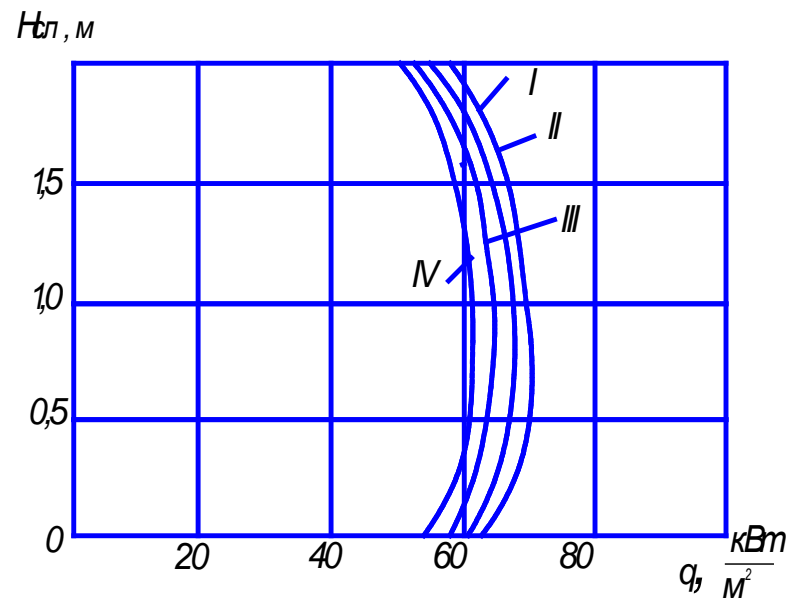
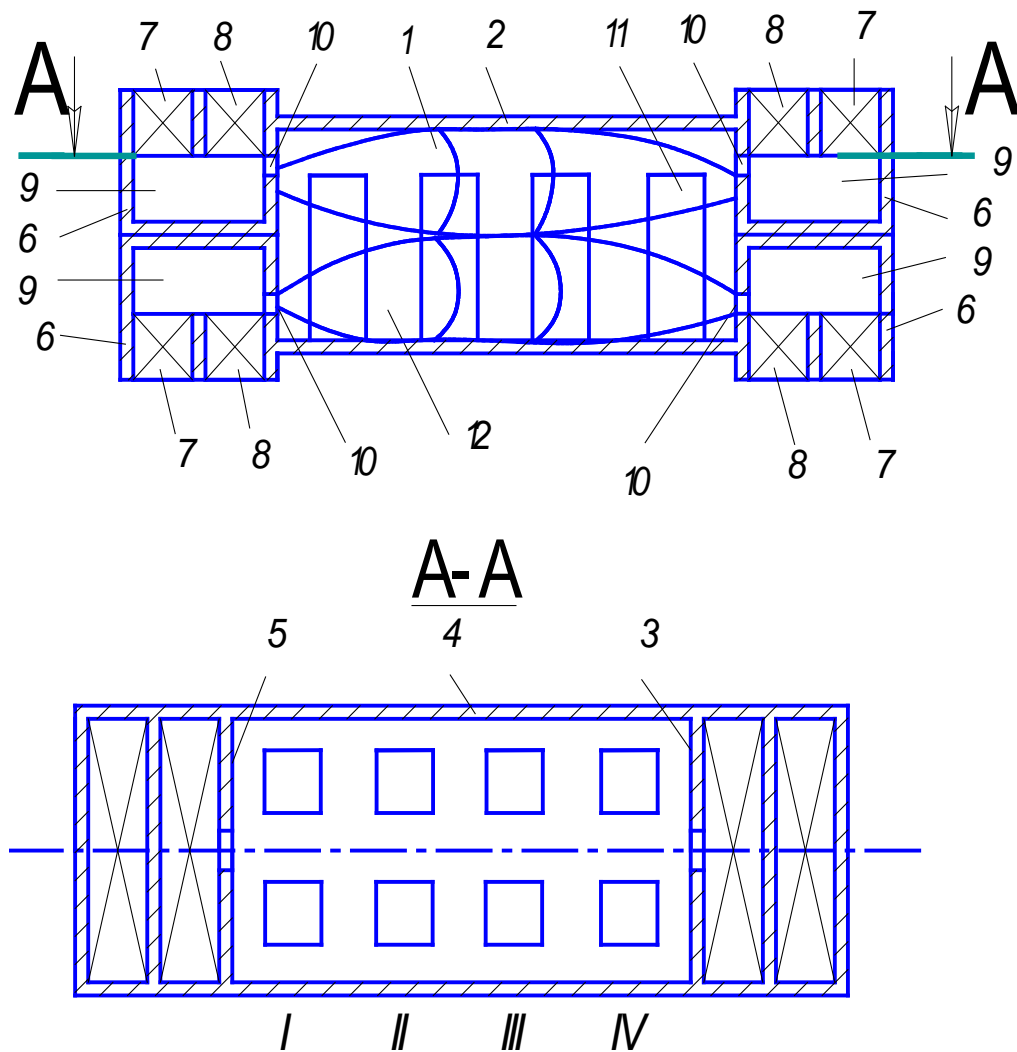
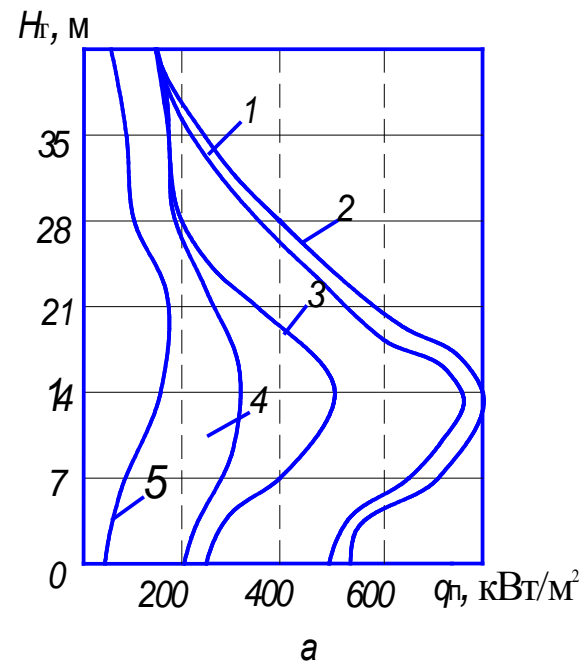
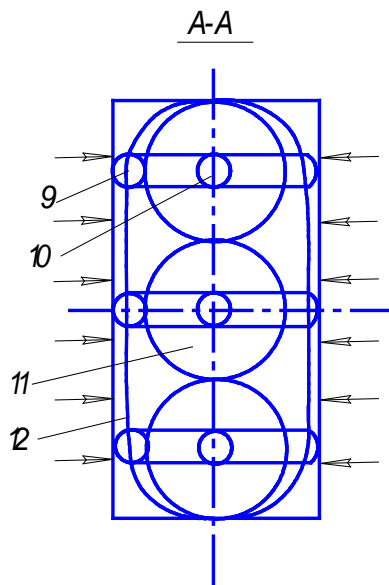
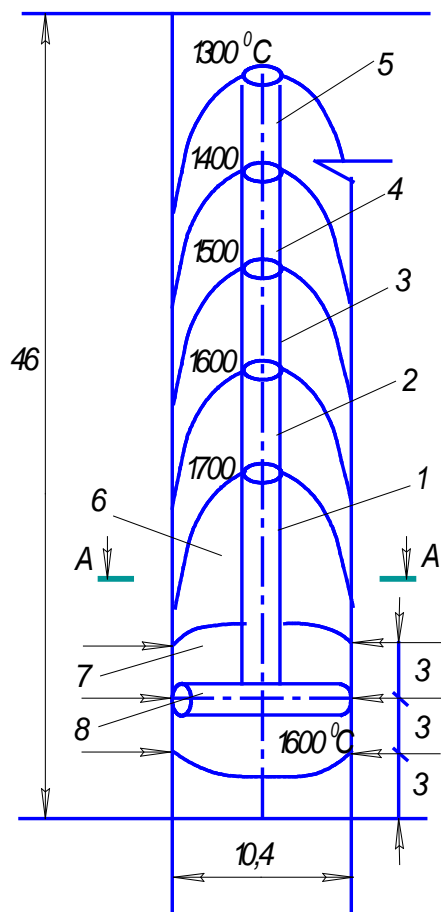
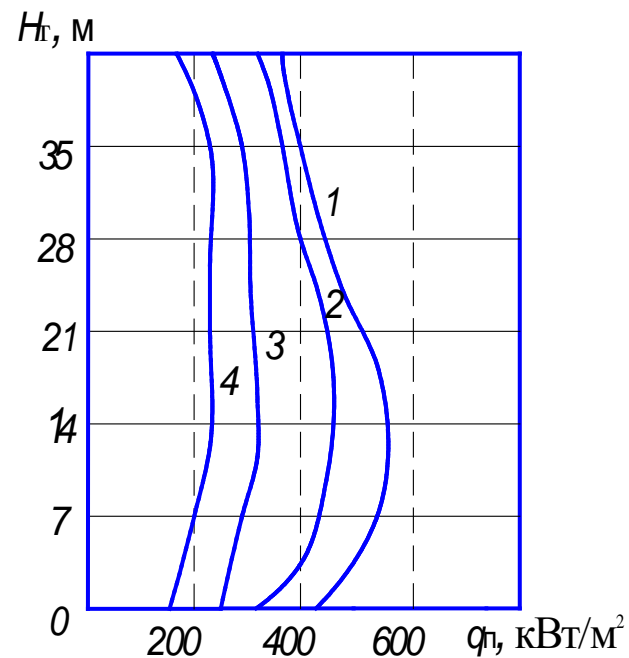
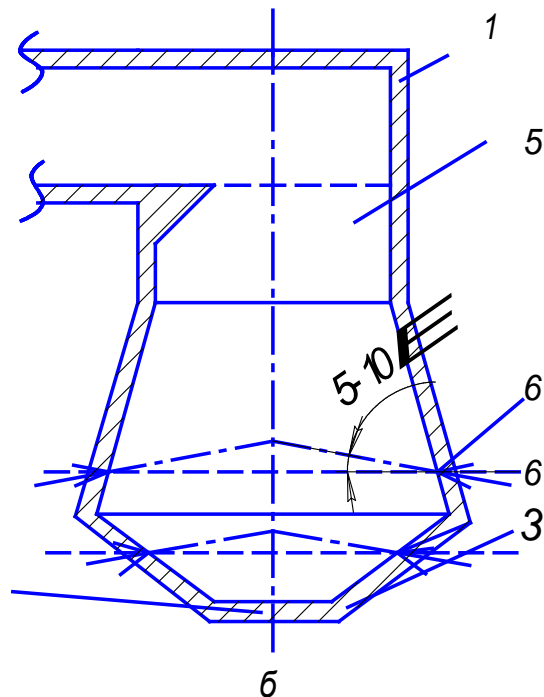
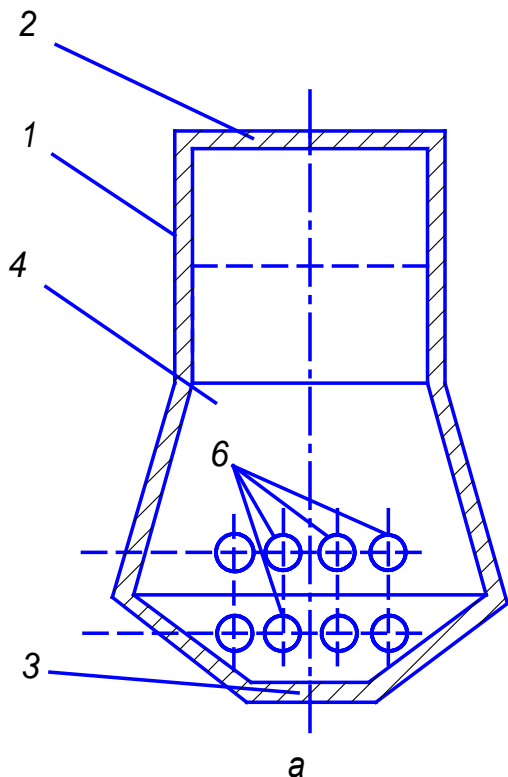


Схема регенеративного нагревательного колодца с блоком регенераторов в два яруса (а) и распределение по высоте слитков интегральных тепловых потоков, падающих на боковые поверхности, обращенные к продольной оси симметрии колодца (б)



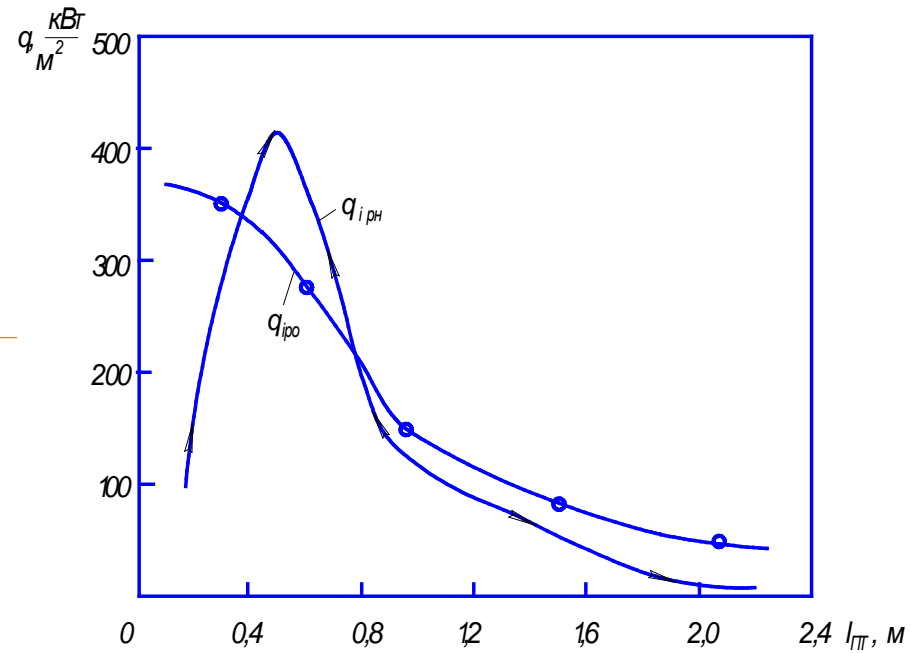
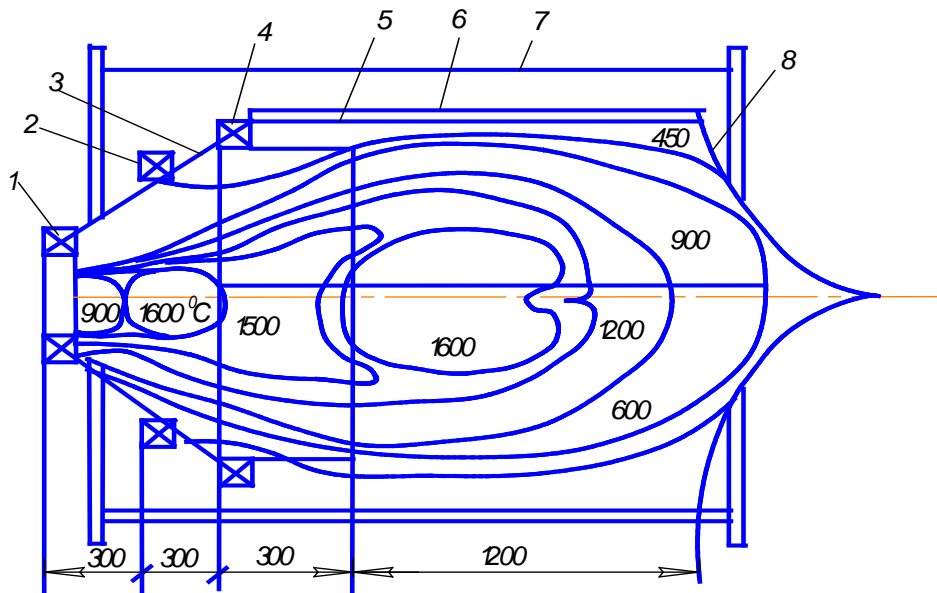
Распределение изотерм в топке парового котла ТГМП-204

Распределение плотности интегрального потока излучения по стенам топки котла типа ТГМП-204



Топка парового котла ТГМ: вид спереди (а), вид сбоку (б)

Распределение плотности интегрального потока излучения по стенам топки котла ТГМ



*Схема камеры сгорания и
распределения изотерм по
объему факела*

*Графики распределения
плотностей потоков нагрева
и охлаждения по длине
пламенной трубы*

370 научных трудов

9 монографий

7 учебников

научное открытие

23 патента на изобретения



Законы и теория теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов, **законы Макарова**



выдающийся вклад в фундамент современного естествознания



- ✓ позволяет рассчитать и организовать рациональный теплообмен по всему миру в десятках тысяч электродуговых и факельных печей, топок паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций,
- ✓ снизить расход электроэнергии и сэкономить млн. тонн топлива,
- ✓ снизить выбросы загрязняющих веществ и техногенную нагрузку на окружающую среду,
- ✓ улучшить качество жизни во многих странах мира



законы Макарова вошли в объем фундаментальных знаний по классической и современной физике

На встрече с членами отделения
Электротехнология Академии электротехнических наук РФ



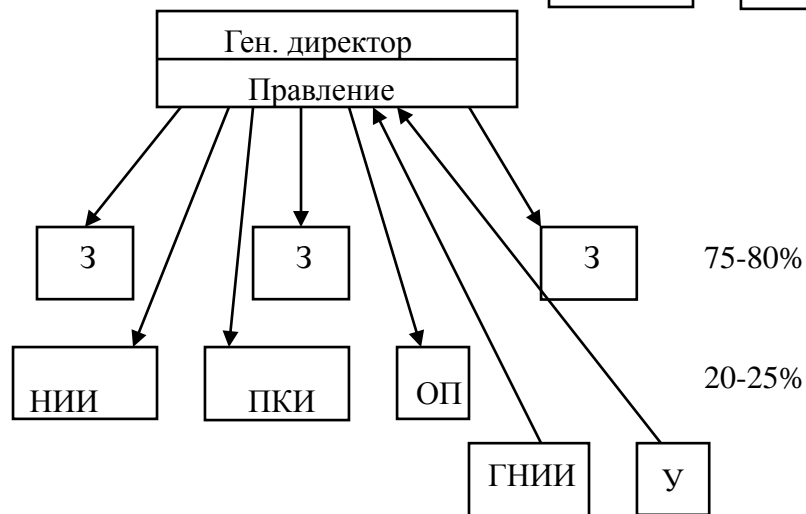
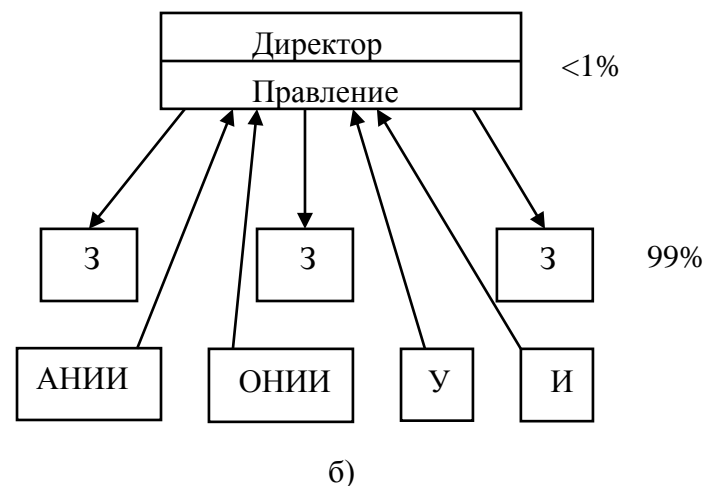
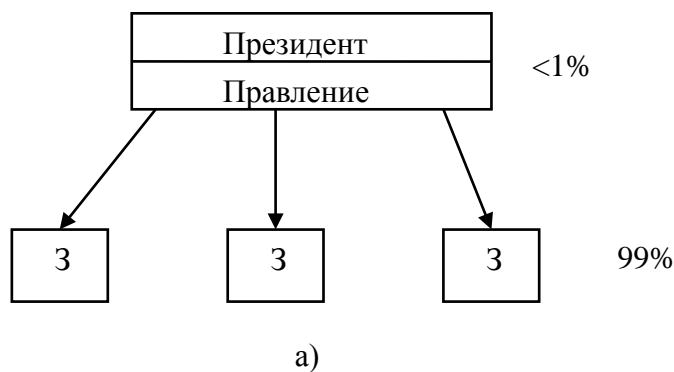
Презентация профессором Макаровым А.Н.
своего учебника коллегам из МЭИ



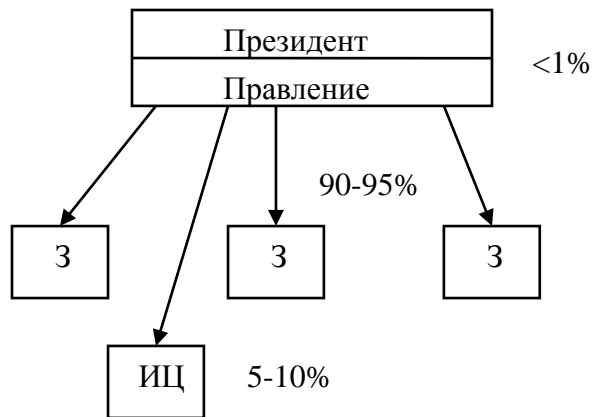
Спасибо за внимание!



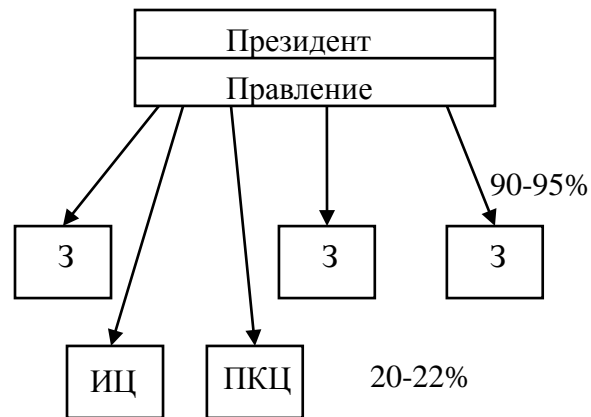
Структура российских компаний в 1900-10 г.г. (а), в 1920-70 г.г. (б), в 1970-80 г.г. (в), цифры – количество работников, занятых в подразделениях компании, %



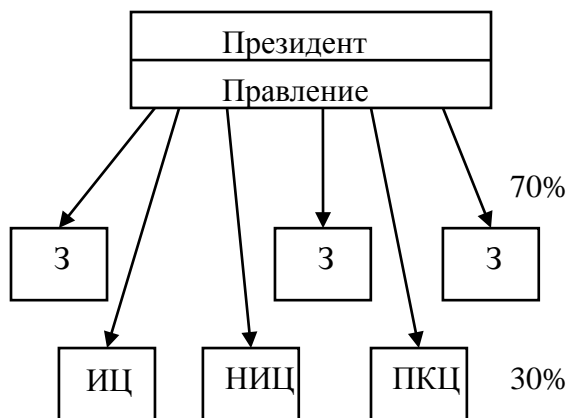
Структура компаний ПРС в 1920-30 г.г. (а), в 1930-40 г.г. (б), в 1940-60 г.г. (в), в 1960-2000 г.г. (г), цифры – количество работников, занятых в подразделениях компании



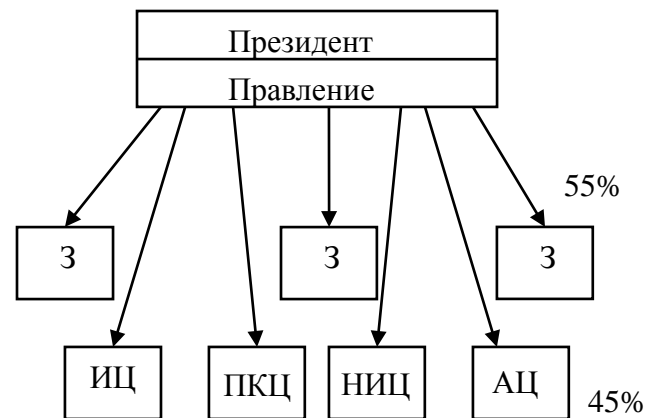
а)



б)

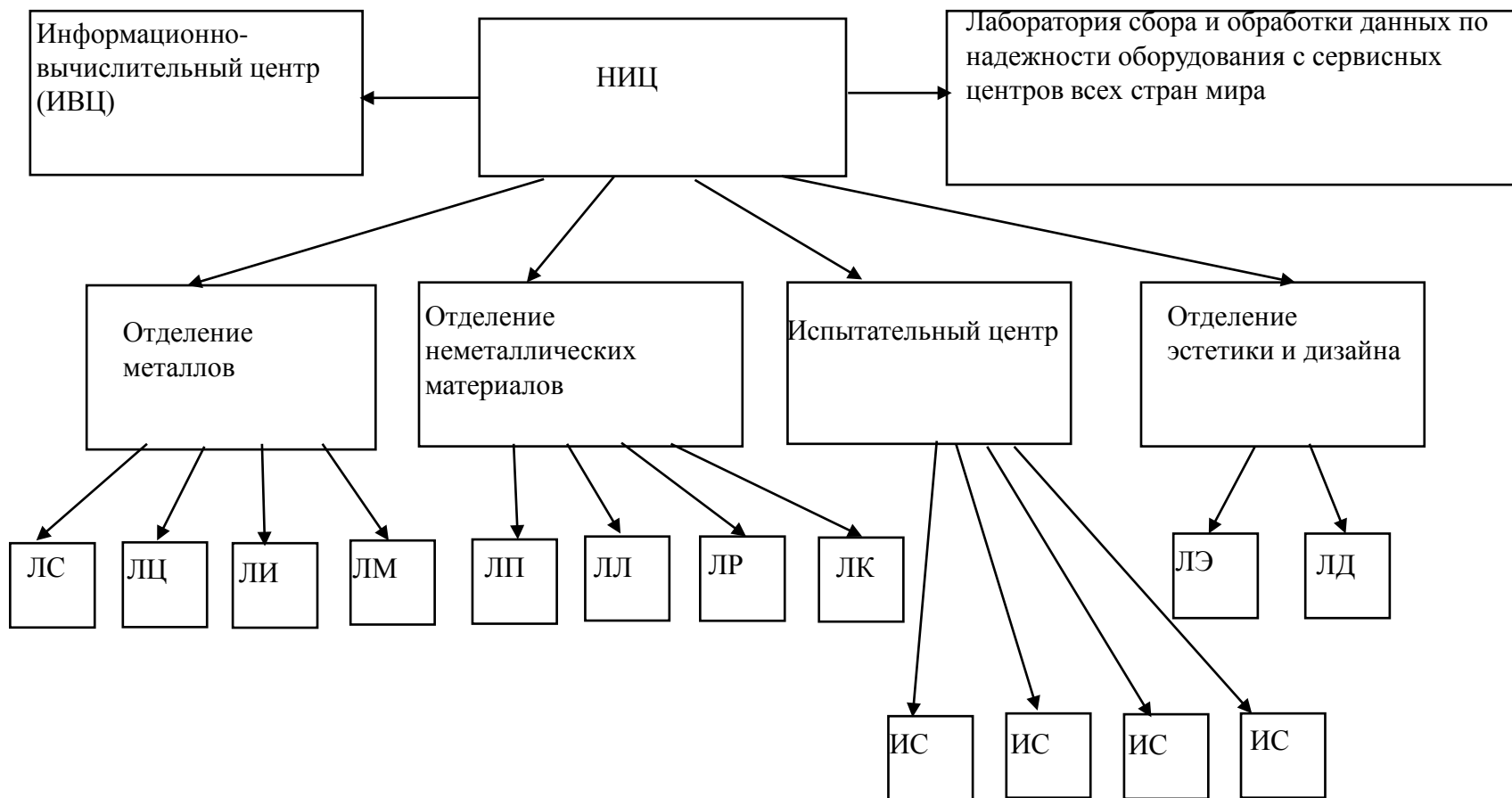


в)



г)

Структура научно-исследовательского центра машиностроительной компании ПРС



Структура российского машиностроительного завода

