

Разработка теории теплообмена в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и плазменно-дуговых сталеплавильных печах (ПДСП)

В металлургии в мире и в РФ 40% стали производят в ДСП, 60% - в конверторах. Во всех отраслях машиностроения РФ в литейном производстве используется несколько тысяч ДСП.

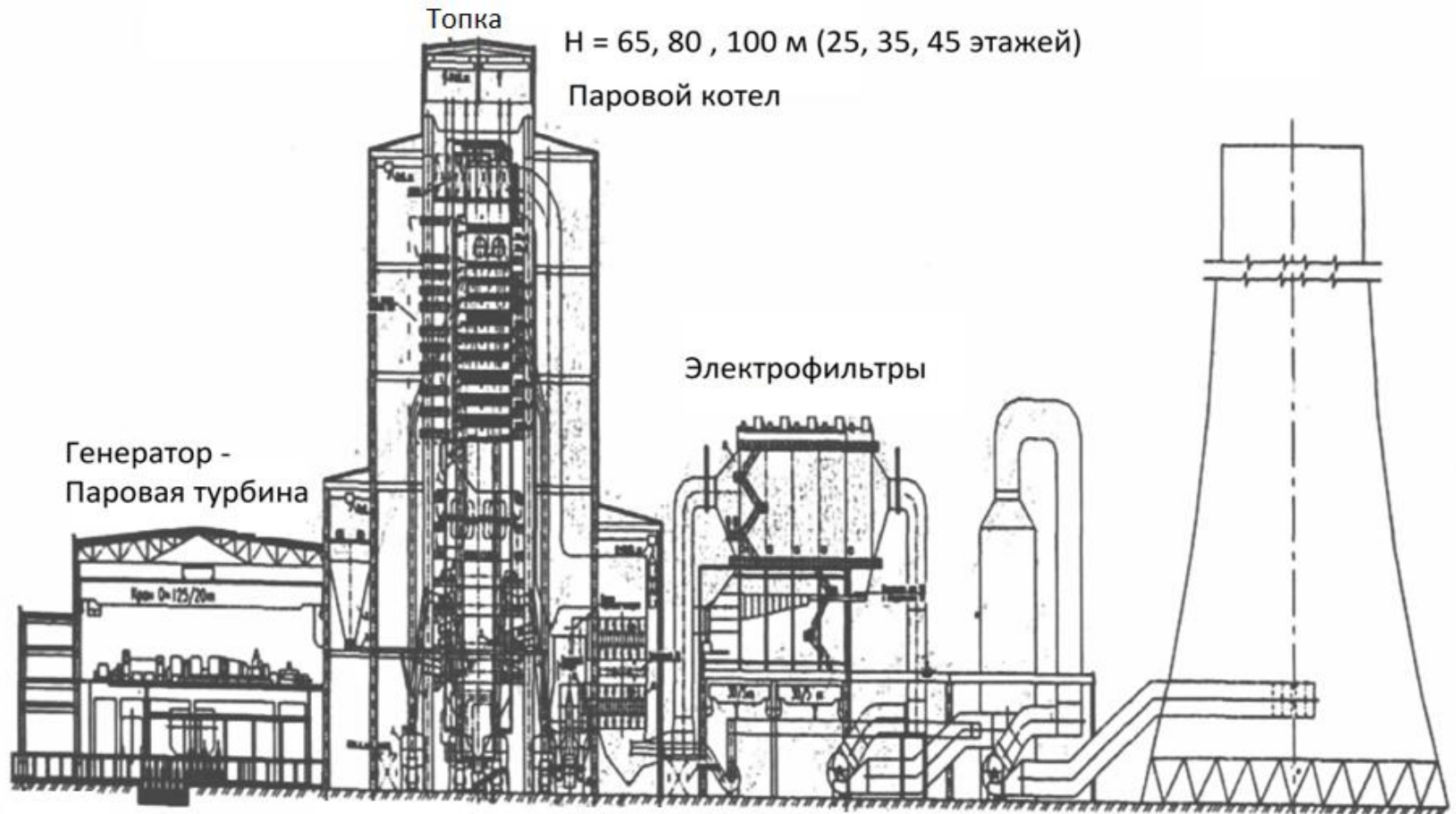
1975-76 г.г. -увеличение мощности ДСП с 30 до 60 МВА. В настоящее время ДСП вместимостью 100 тонн – ДСП-100 потребляют электрическую мощность 90-120 МВА, равную мощности, потребляемой областным центром с населением 500 тыс. человек и расположенной в нем промышленностью. Производительность ДСП-100 – один млн. тонн стали в год.



Литературный обзор, проведенный автором в 1979 г., аспирантом МЭИ, в ГПНТБ за 1978-1900 г.г. показал отсутствие формул для расчета теплообмена в ДСП. Электрическая дуга, основной источник тепла в ДСП, как ионизированный газовый объём теплового излучения представлял «черный ящик».

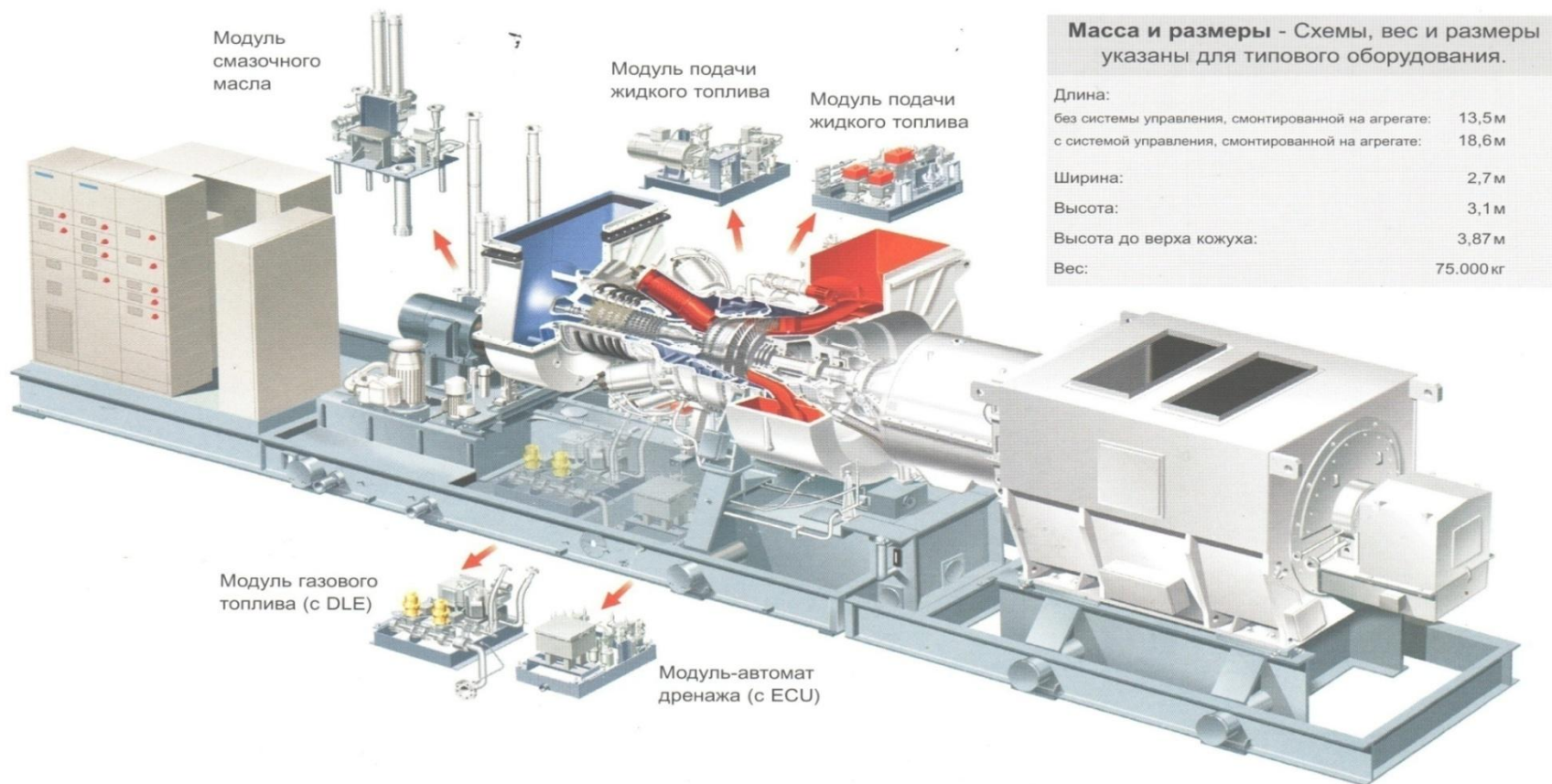
Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) вместимостью 6 тонн

Энергоблок 660 МВт



Топки паровых котлов тепловых электростанций потребляют 80-85% всех мировых топливно-энергетических ресурсов: нефти (мазута), газа, угля. Около 67% электроэнергии в мире вырабатывается на тепловых электростанциях при сжигании жидкого, пылевидного, газообразного топлива.

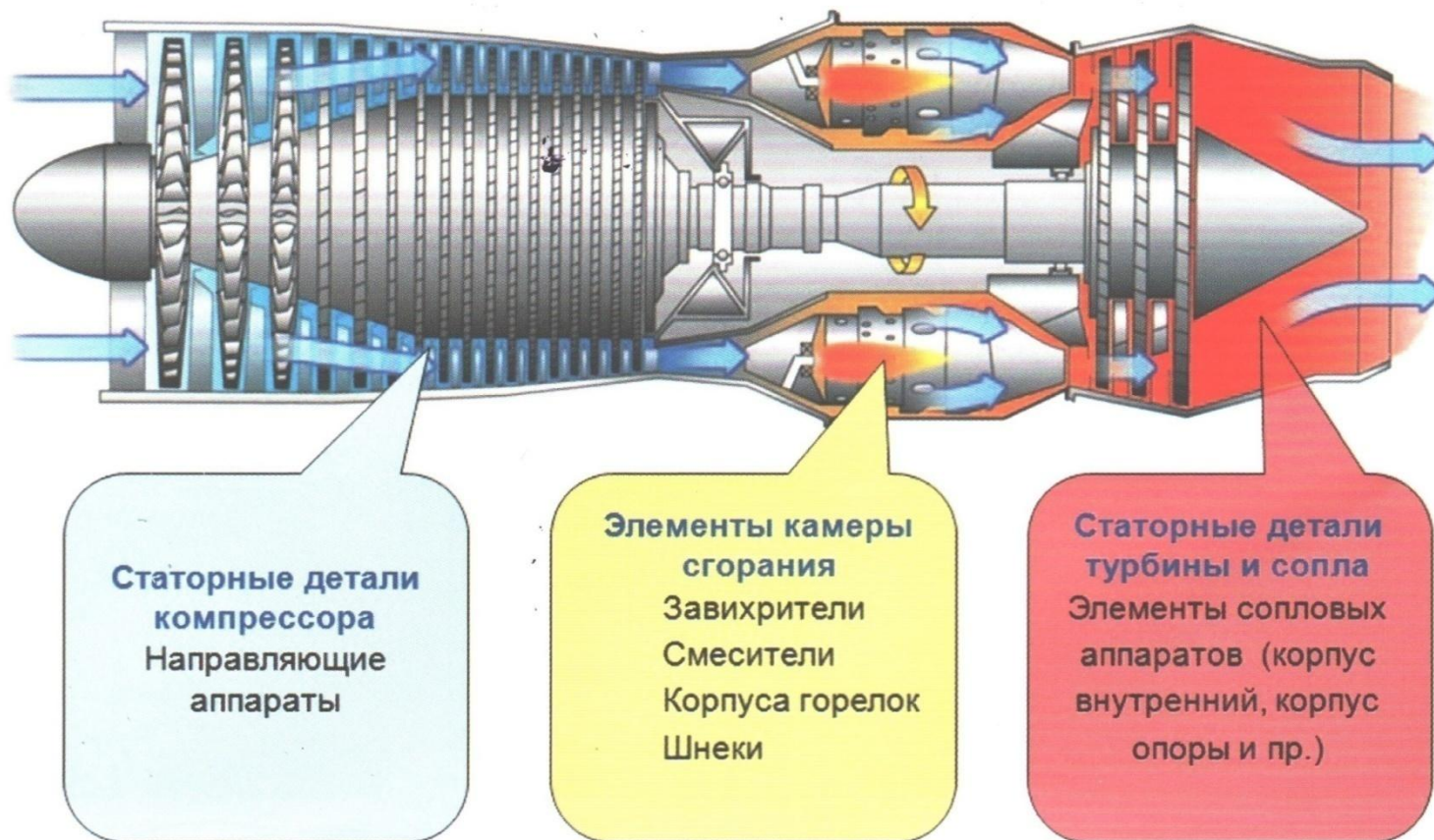
Газотурбинная электростанция



Данные о теплообмене в камерах сгорания (КС) газотурбинных установок получают многомесячными экспериментальными исследованиями, так как ни один из существующих методов расчета не дает полной картины теплообмена факела с поверхностями нагрева КС. С открытием законов теплового излучения газового объема факела появилась возможность рассчитать полную картину теплообмена в КС.

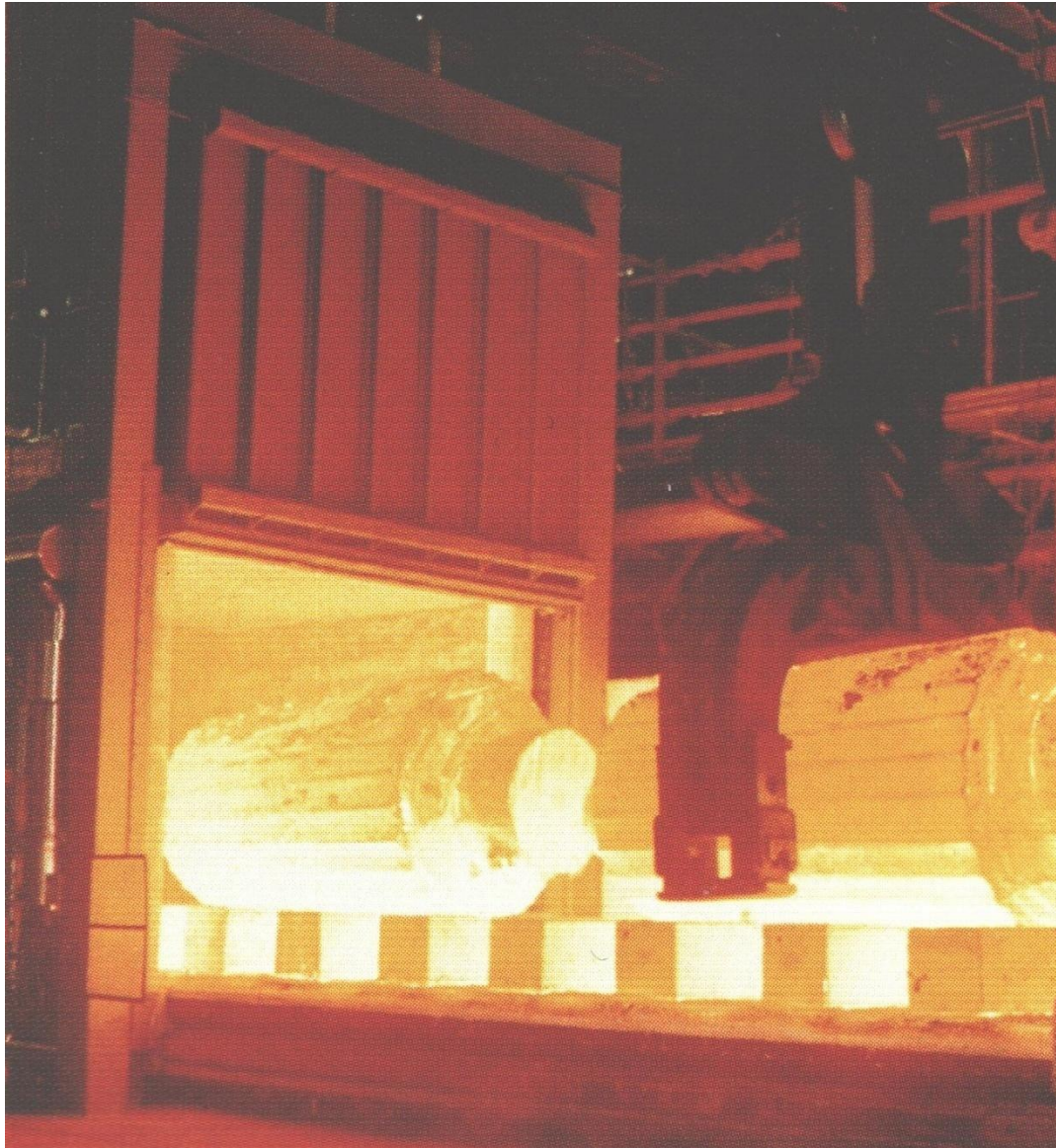
Газотурбинный двигатель (ГТД)

При создании нового ГТД проводят многолетние опытно-экспериментальные исследования с разрушением нескольких десятков опытных образцов ГТД, прежде чем выйти на промышленный экземпляр. Данные о теплообмене в камерах сгорания жидкостного реактивного двигателя (ЖРД) так же получают опытно-экспериментальным путём.



Камеры сгорания ГТД и ЖРД для существующих расчетных методик представляют «черный ящик». Использование законов теплового излучения газовых объёмов факелов позволяет получить полную картину теплообмена в КС ГТД и ЖРД.

Нагревательная факельная печь с выкатным подом

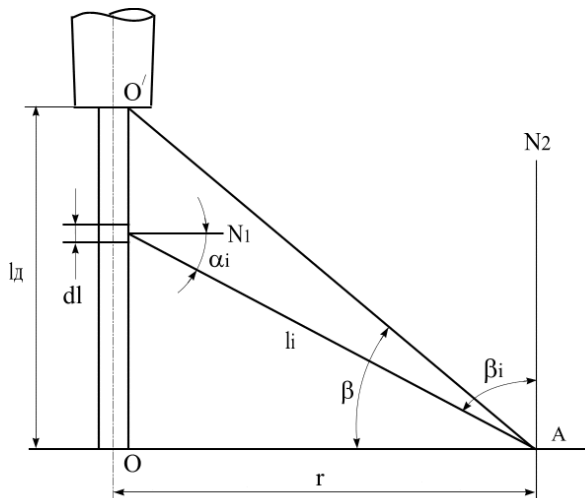


До открытия законов теплового излучения газовых объемов факелов рассчитывали одинаковый по всем поверхностям нагрева средний тепловой поток по закону Стефана-Больцмана, для данной печи:

$$q_{\text{ср}} = 38 \text{ кВт} / \text{м}^2$$

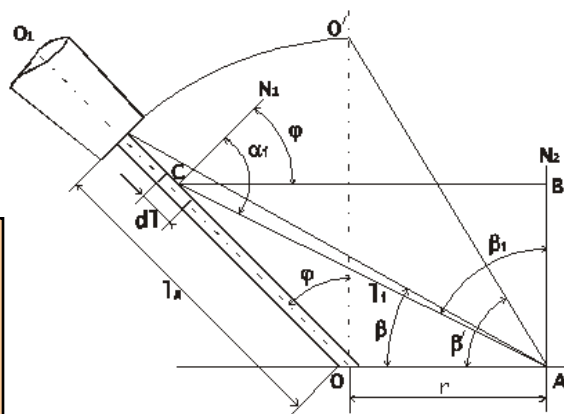
Однако изделия нагреваются в факельной печи неравномерно, и этому не было объяснения. Теплообмен в факельных печах представлял «черный ящик», неисследованное явление.

Излучение дуги плазмотрона на ванну металла и выведенные математическим путем расчетные формулы



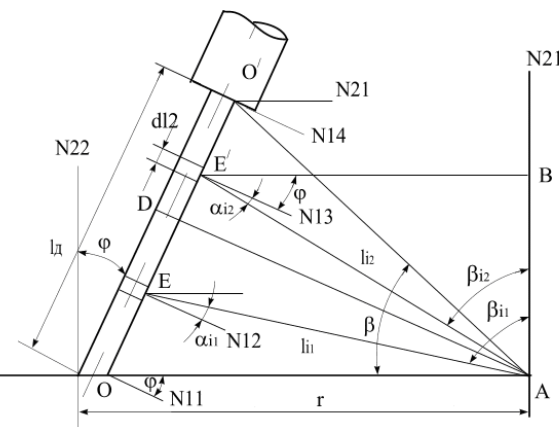
$$q = \int_0^\beta \frac{\alpha_{uzl} P_D}{\pi^2 r l_D} \cos \alpha_i \sin \alpha_i d\alpha =$$

$$= \frac{\alpha_{uzl} P_D}{\pi^2 r l_D} \int_0^\beta \cos \alpha_i \sin \alpha_i d\alpha = \frac{\alpha_{uzl} P_D}{2\pi^2 r l_D} \sin^2 \beta.$$



$$\sin \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) = \cos \varphi \text{ и } \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi,$$

$$q = \frac{\alpha_{uzl} P_D}{2\pi^2 r l_D} \left\{ \begin{array}{l} \sin^2 \beta + \sin^2 \varphi \\ -\operatorname{tg} \varphi \sin \beta + \cos \varphi \sin \beta \end{array} \right\}$$



$$q = \frac{\alpha_{uzl} P_D}{2\pi^2 r l_D} \left\{ \begin{array}{l} \sin^2 \beta - \sin^2 \varphi \\ +\operatorname{tg} \varphi \sin \beta + \sin \beta \cos \varphi \end{array} \right\}$$

Автором научного открытия разработана теория теплообмена в дуговых и плазменно-дуговых сталеплавильных печах.

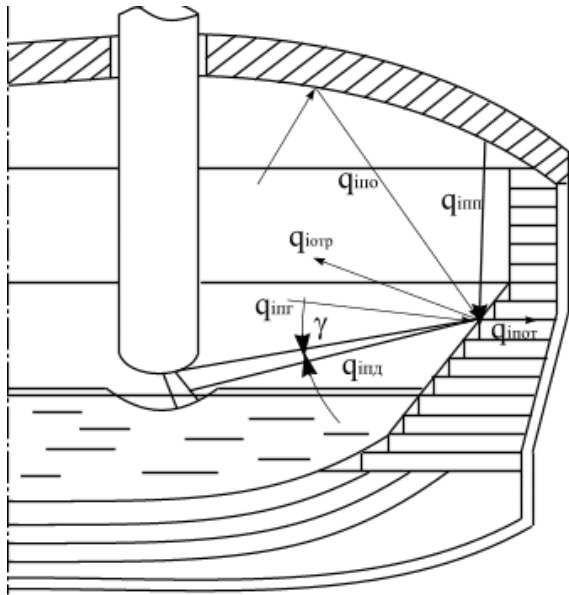


Схема теплообмена в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока

$$q_{in} = q_{in.Д} + q_{in.o.Д} + q_{i.n.n.} + q_{in.o.n.} + q_{i.ncг}$$

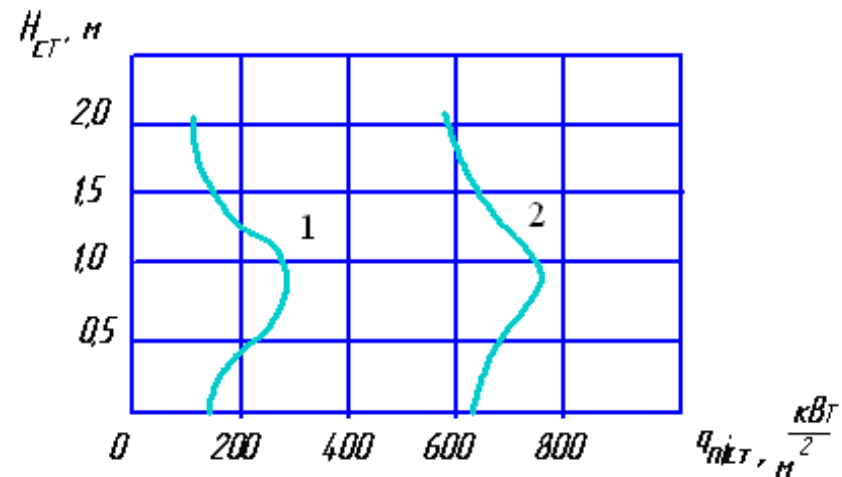
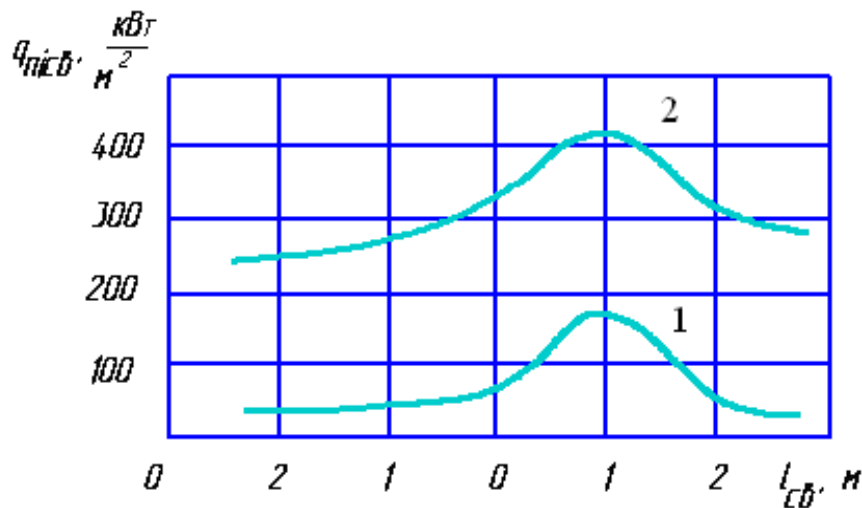
$$q_{ин.Д} = \sum_1^n \frac{\varphi_{Дji} P_{Дj}}{F_i} e^{-kl} \quad q_{ин.o.Д} = \sum_1^n \frac{P_{Дj} (\psi_{Дjk} - \varphi_{Дjk} e^{-kS})}{F_k}$$

$$q_{ин.п.} = \sum_1^n \frac{\varphi_{ji} Q_{jc}}{F_i} e^{-kl} \quad q_{ин.o.п.} = \sum_1^n \frac{Q_{jc} (\psi_{jk} - \varphi_{jk} e^{-\kappa S})}{F_k}$$

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

Теория подтверждена экспериментальными исследованиями автора на ОЭМК, ОХМК, Северсталь, Метчел, ДМЗ, Электросталь.

Получено 15 патентов на изобретения дуговых и плазменно-дуговых сталеплавильных печей и способов плавки в них.



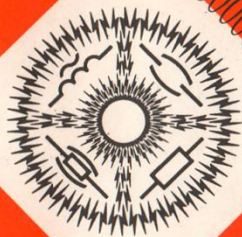
Распределение плотности падающих потоков излучений по образующей свода (а) и по высоте стен (б), рассчитанное для поглощающе-излучающей (1) и диатермической (2) среды

1978-95 г.г. – публикация теории и её экспериментальных подтверждений в нескольких десятках статей в журналах по металлургии и энергетике.

1992 г. – выпуск в свет в «Энергоатомиздате» монографии «Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей», которая стала основной книгой по теплообмену в ДСП и ПДСП у российских металлургов, преподавателей, студентов металлургических кафедр университетов и аналогичного контингента стран ближнего зарубежья.

2014 г. – выпуск в свет рекомендованного УМО Минобрнауки РФ учебника «Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014 г. 384 с.», который является основным учебником по теплообмену в ДСП и используется в университетах, металлургических компаниях и НИИ.

**БИБЛИОТЕКА
ЭЛЕКТРОТЕРМИСТА**



А. Н. МАКАРОВ А. Д. СВЕНЧАНСКИЙ

**ОПТИМАЛЬНЫЕ
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ
ДУГОВЫХ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ
ПЕЧЕЙ**

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

**БИБЛИОТЕКА
ЭЛЕКТРОТЕРМИСТА**

Выпуск 79

Основана в 1959 году

А. Н. МАКАРОВ А. Д. СВЕНЧАНСКИЙ

**ОПТИМАЛЬНЫЕ
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ
ДУГОВЫХ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ
ПЕЧЕЙ**



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1992

А. Н. МАКАРОВ

ТЕПЛООБМЕН

В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ И ФАКЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ



Макаров Николай Николаевич — доктор технических наук, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника» Тверского государственного технического университета. Награжден почетными грамотами Губернатора Тверской области (1997, 2012 гг.), Магистранта РФ (2003 г.), золотой медалью им. П.Л. Капицы (2013 г.).

Автор научного открытия в области металлургии и энергетики, 290 научных трудов, в том числе 7 монографий, 5 учебников, 16 патентов на изобретения, 72 статей в центральных журналах металлургического, энергетического направлений.

Гипотеза на научное открытие закономерностей теплообмена электрической дуги в электрометаллургических печах

сформулирована Макаровым А. Н. в 1979–1982 гг. и защищена в НИУ МЭИ в 1982 г. в виде кандидатской диссертации. Теоретическое обоснование открытия, вывод формул для расчета теплообмена в электродуговых и плазменно-дуговых сталеплавильных печах осуществлен в 1983–1994 гг. Результаты научных работ обобщены и защищены им в 1995 г. в НИУ СПб ЭТУ

в виде докторской диссертации «Теория теплообмена в электродуговых печах для плавы стали». В 1995–2001 гг. Макаровым А. Н. открыты закономерности (законы) теплообмена факела в металлургических печах и энергетических установках. В 2001–2010 гг. на основе открытия

законов разработана современная теория теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания, которая за последние 10 лет получила экспериментальное подтверждение. Результаты научных работ 1979–2010 гг. обобщены Макаровым А. Н. в 2010 г. в виде монографии на

научное открытие. По положительным результатам экспериментальной проверки в НИУ МИСиС, ЦНИИ Чермет, Институт РАН Макарову А. Н. в 2011 г. был выдан патент № 2377 на научное открытие. Научная биография Макарова А. Н. с 2007 г. ежегодно публикуется в американском биографическом сборнике «Who's who in the world», в 2013 г. вышла в сборнике «2000 выдающихся интеллектуалов 21 века» Международного биографического общества, Великобритания, Кембридж.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ДАНИ»
Издательство качества
«Сделано в Санкт-Петербурге»



А. Н. МАКАРОВ

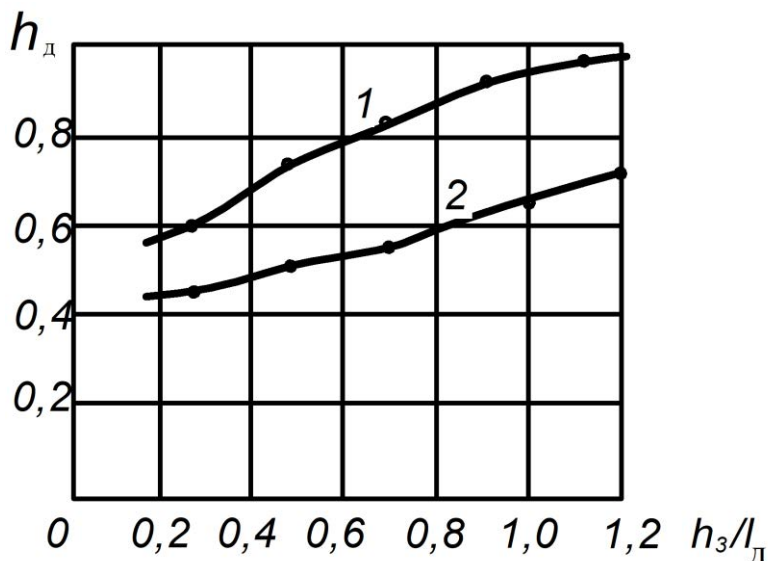
ТЕПЛООБМЕН

в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках

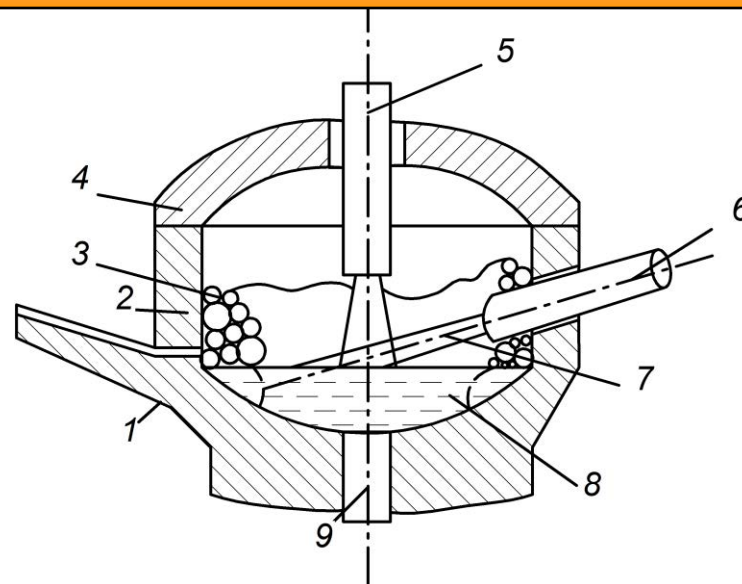
ДОПУЩЕНО
УМО по образованию в области металлургии
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по направлению «Металлургия»

САЙТ ПИТЕРБУРГ
МОСКВА
СП. МАКАРОВ

*Расчетные данные экспериментально подтверждены профессорами кафедры
«Металлургия стали и ферросплавов»
НИТУ МИСис и персоналом «Уральская сталь»*



Зависимость КПД дуги от отношения высоты задуновения дуги в металл и шлак к длине дуги в дуговой сталеплавильной печи с независимым током дуг (график 1) и дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока (график 2).



Патент: Плазменно-дуговая сталеплавильная печь постоянного тока с двумя плазмотронами.. 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – шихта; 4 – свод; 5 – сводовый плазмотрон; 6 – стеновой плазмотрон; 7 – дуга; 8 – ванна металла; 9 – подовый электрод

В РФ свыше 50 100-т ДСП, мощностью 90 МВт, производительностью 1 млн. т/год.

1995 г. $g_{эл} = 460$ кВт·ч/т 2015 г. $g_{эл} = 360$ кВт·ч/т

Экономия электрической энергии 100 млн. кВт·ч в год на 1 печь или 22% или 200 млн. руб.

Определенная заслуга в этом принадлежит разработчику теории и её практическом использовании сотрудниками металлургических компаний.

XXIV МЕЖДУНАРОДНАЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ
ВЫСТАВКА
МЕТАЛЛ-ЭКСПО'2018



XXIV INTERNATIONAL
INDUSTRIAL
EXHIBITION
METAL-EXPO'2018

Награждается коллектив

**Тверской государственный
технический университет**

за подготовку и издание учебного пособия «Теплообмен
в электродуговых и факельных металлургических печах
и энергетических установках»

**СЕРЕБРЯНОЙ
МЕДАЛЬЮ**
лауреата международной выставки
«Металл-Экспо»

(Макаров А.Н.)

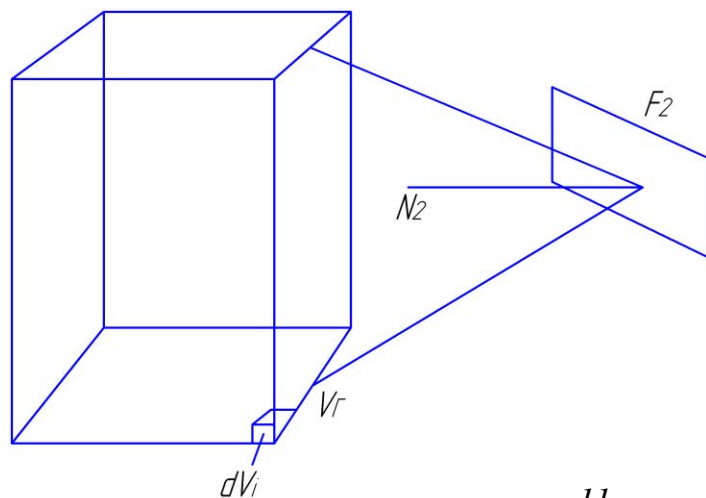
Сопредседатель Оргкомитета «Металл-Экспо»

Президент Российского союза
поставщиков металлопродукции

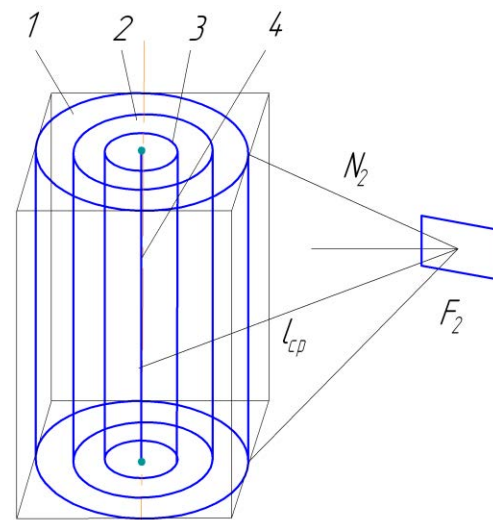
А.Г. Романов

Научное открытие законов теплового излучения газовых объёмов факелов печей, топок, камер сгорания ГТУ, ГТД, ЖРД.

Излучение газовых объемов на расчетную площадку F_2



$$q_{V_2} = \varphi_{V_2} \varepsilon_2 c_s T_2 F_2^{-1} e^{-kl_{cp}}$$



$$\varphi_{V_2} = \iiint_{a b h} \frac{\cos \alpha_i \cos \beta_i}{2\pi l_i^2} da db dh$$

Расчет теплообмена в точке ПК представляет собой сверхсложную задачу, так как необходимо рассчитать тепловое излучение на расчетную площадку всех 10^{30} - 10^{45} атомов, составляющих факел. Количество атомов в точке ПК это приблизительно столько, сколько песчинок в пустыне Сахара. Все атомы, составляющие факел, излучают на любую расчетную площадку в точке ПК, это излучение необходимо учесть в расчетах.

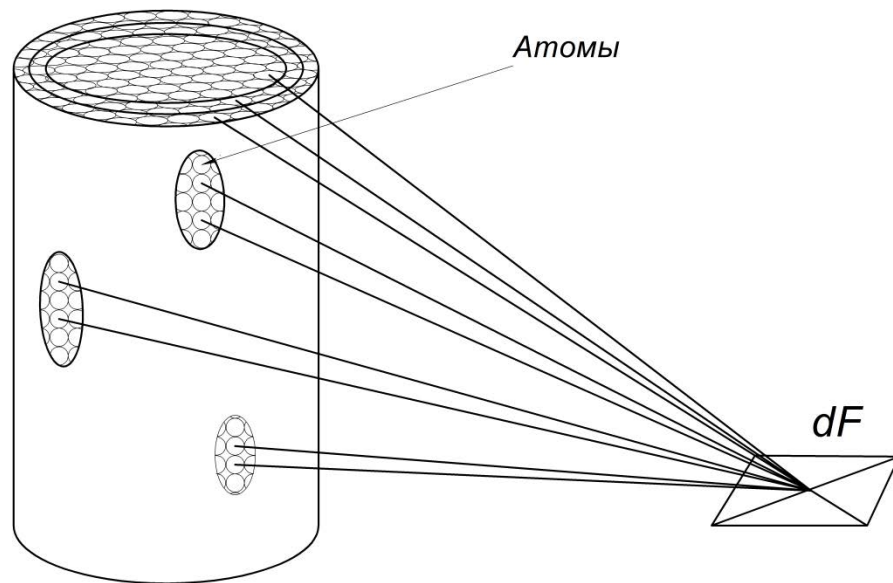
Законы теплового излучения газовых объёмов факелов с целью соблюдения многовековых научных традиций и авторского права в дипломе на научное открытие, статьях, учебнике, аналогично законам излучения АЧТ, законам Стефана-Больцмана, Планка, Вина, названы фамилией автора их открывшего, законами Макарова. Открыты в 1996-2001 годах.

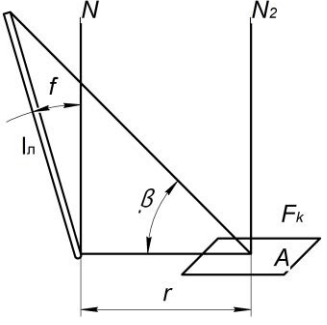
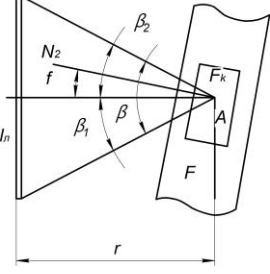
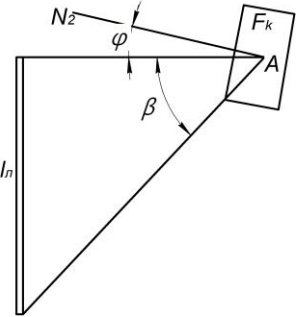
Излучение изотермических изохорных коаксиальных газовых объёмов на расчетную площадку dF .

Закон I. Закон теплового излучения цилиндрического газового объёма (открыт в 1980 году).

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

Плотность потока теплового излучения цилиндрического газового объёма на расчетную площадку q_{FdF} прямо пропорциональна мощности объёма P_F , доли излучения на расчетную площадку φ_{F_0dF} от всего излучения объёма и обратно пропорциональна площади площадки F_0 , коэффициенту поглощения газовой среды, средней длине пути лучей l от излучающих атомов объёма на площадку.



№ 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>	$\varphi_{lk} = \left[F_k / (\epsilon \pi^2 r l_n) \right] \times \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) - \sin \varphi \sin^2 \beta \right]$
2		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси, напротив цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = \left[F_k / (\epsilon \pi^2 r l_n) \right] \left\{ \cos \varphi \left[\beta + \sin \beta \cos (\beta_1 - \beta_2) \right] - \sin \varphi \left[\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2 \right] \right\}$
3		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси; центр площадки находится напротив верхнего среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = \left[F_k / (\epsilon \pi^2 r l_n) \right] \left\{ \sin^2 \varphi \left[\beta + \sin^2 \varphi \right] - \sin^2 \varphi \left[\beta + \cos \varphi \left[\beta + \sin \beta \right] \right] \right\}$

Пример расчета по законам излучения газовых объёмов, законам Макарова

В России на предприятиях установлено несколько десятков тысяч факельных нагревательных печей

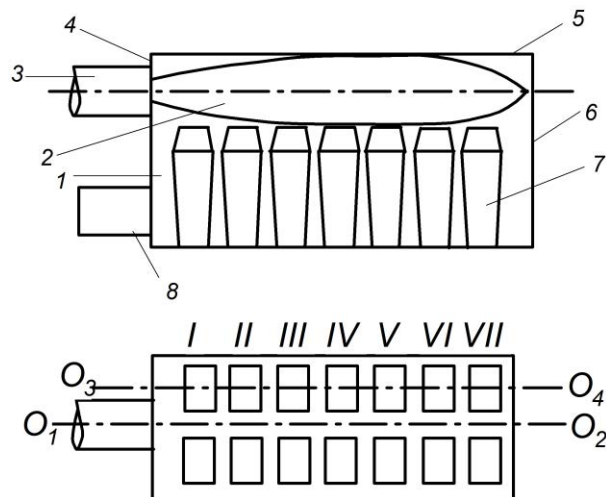
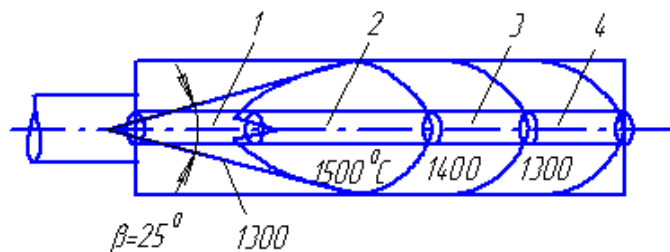
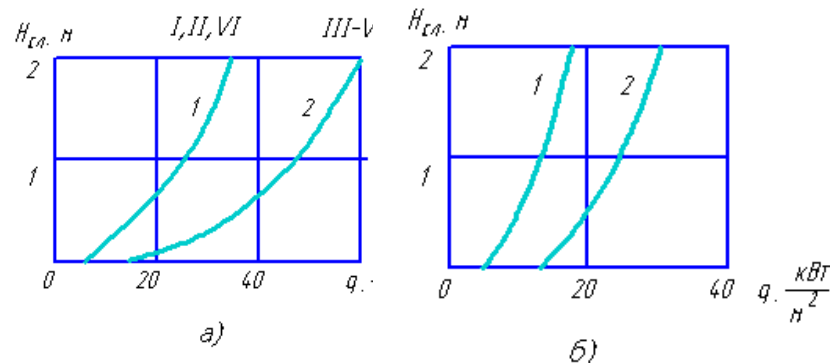


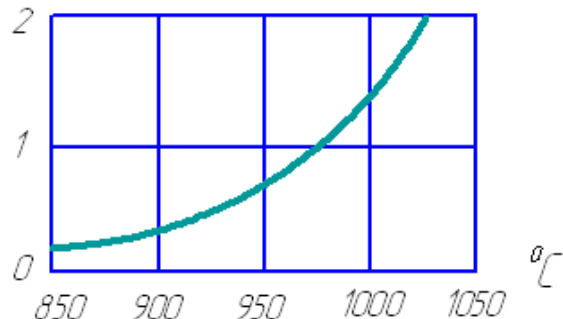
Схема рабочего пространства нагревательного колодца и размещения слитков в нем:
I – VII – номера рядов слитков



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



а)



в)

Распределение тепловых потоков в боковой поверхности слитков, обращенной к поверхности стен (а), к оси O_1O_2 (б), изменение температуры по высоте слитков на расстоянии 80 мм от поверхности (в)

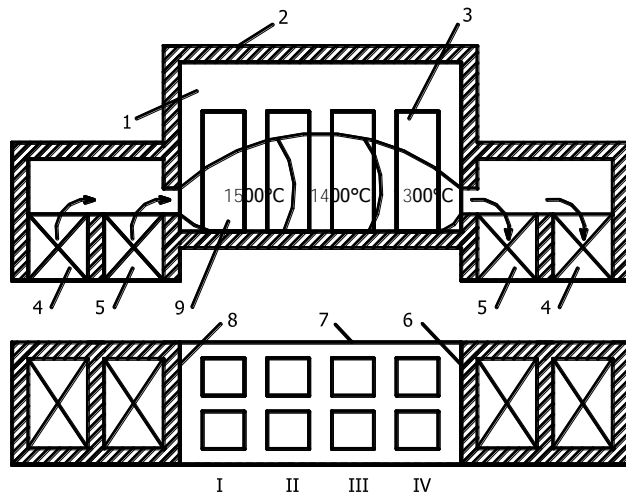
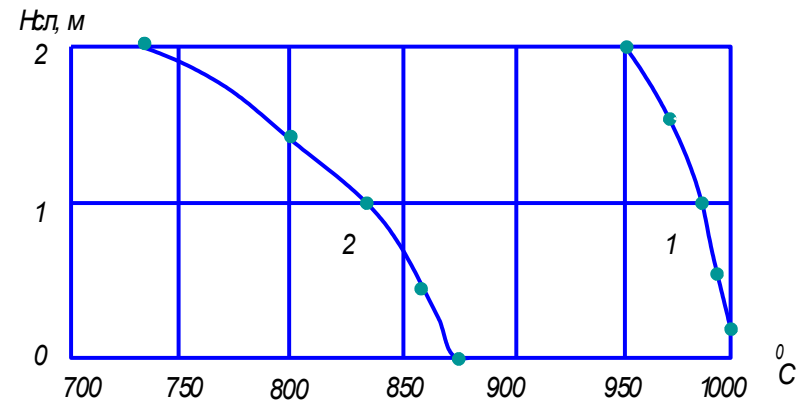
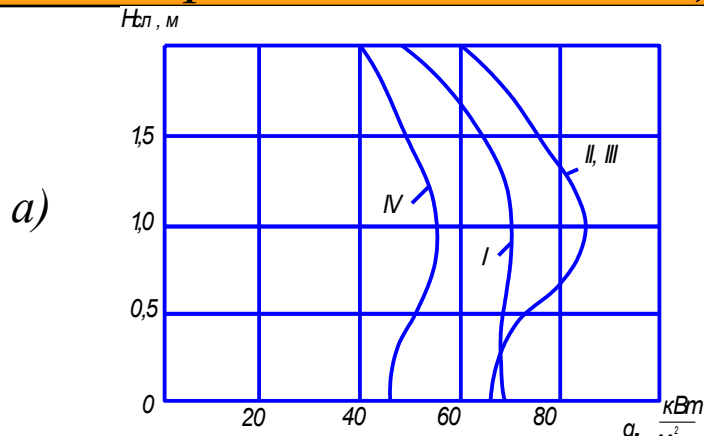


Схема регенеративного нагревательного колодца



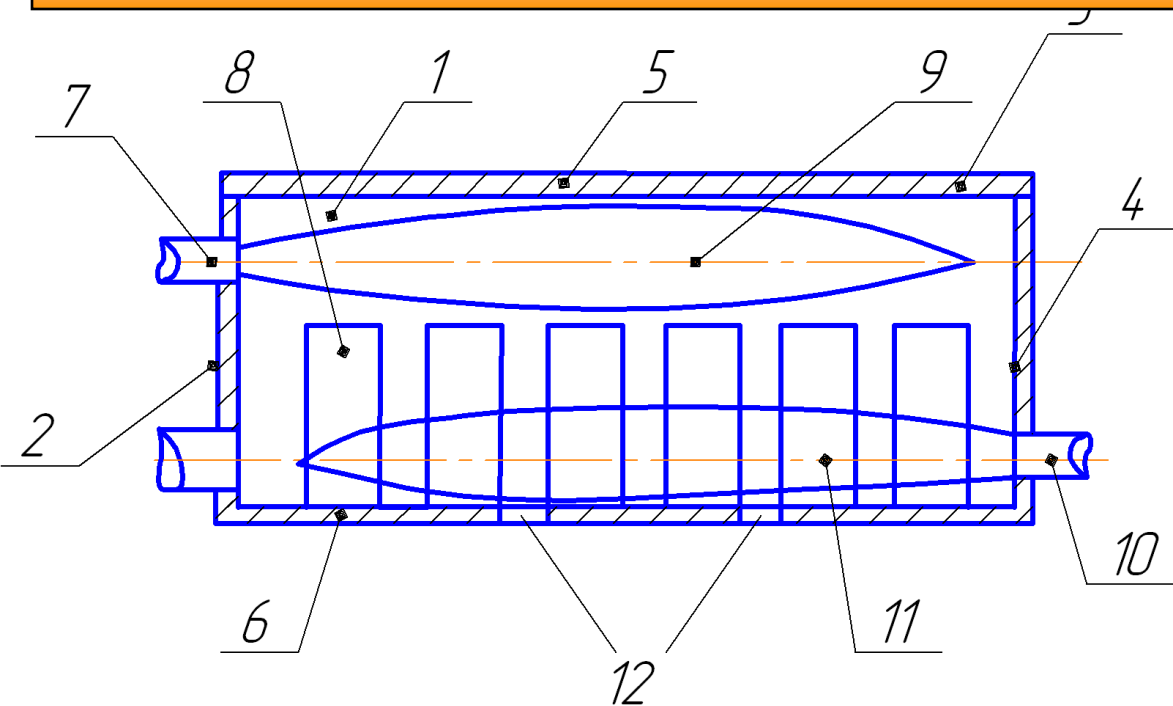
Изменение температуры по высоте боковой поверхности слитков, обращенной к стене колодца (1) и к продольной оси симметрии колодца (2) через 3 часа от начала нагрева



б)

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

Схема рекуперативного нагревательного колодца с двумя факелам



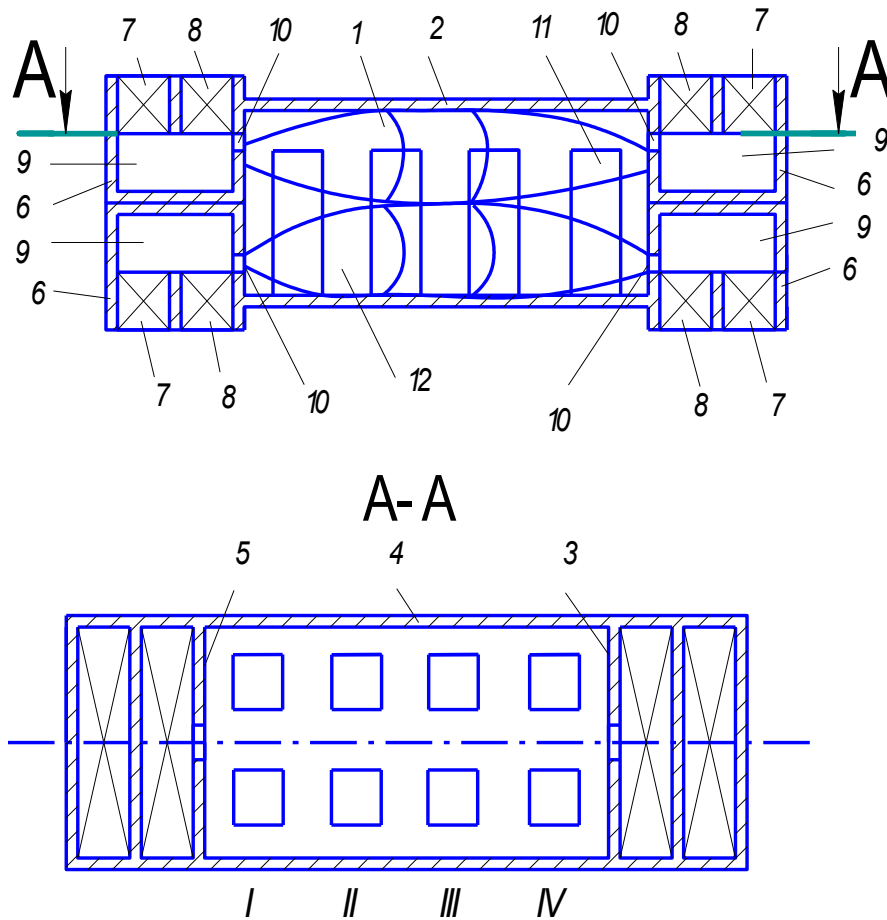
Конструкция нагревательного колодца не изменялась в течение 80 лет.

Получены патенты на изобретения факельных печей:

- I – с 2-мя горелками;
- II – с 6-ю горелками;
- III – с 12-ю горелками

Расчет по законам теплового излучения газовых объемов позволил получить впервые в России, определив промышленно-развитые страны, полную информацию о падающих на все грани слитков и других нагреваемых изделий потоков тепловых излучений факела, нагретых стен, свода, пода, продуктов горения с учетом переотражения и поглощения, выявить причины неравномерности нагрева, разработать способы и устройства нагрева, при которых повышается равномерность нагрева изделий, снижается время нагрева и расход топлива, повышается производительность печей (получены патенты на изобретения).

Получен патент на изобретение:



Конструкция
нагревательного колодца не
изменялась в течение 80
лет.

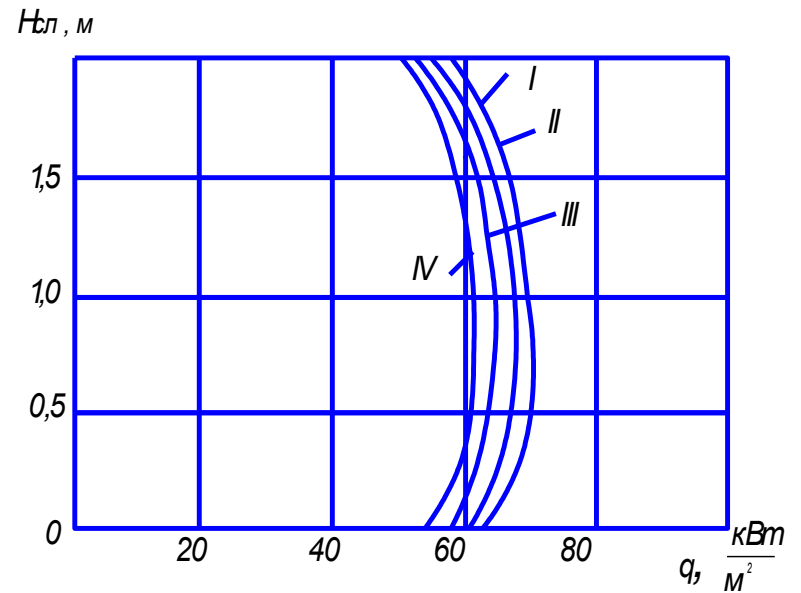
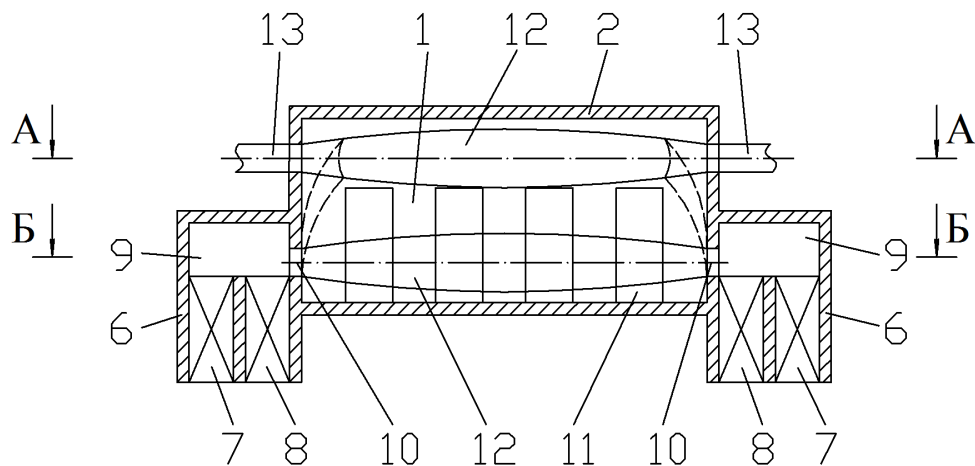
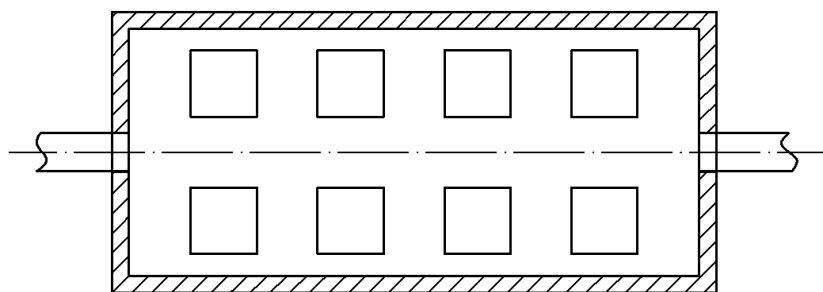


Схема регенеративного нагревательного колодца с блоком регенераторов в два яруса (а) и распределение по высоте слитков интегральных тепловых потоков, падающих на боковые поверхности, обращенные к продольной оси симметрии колодца (б)



A-A



*Патенты на изобретения
факельных печей:
I – с 2-мя ярусами регенераторов;
II – с верхним и нижним факелом;
III – с нижним и 3-мя верхними
факелами;
IV – с нижним и 6-ю верхними
факелами*

Б-Б

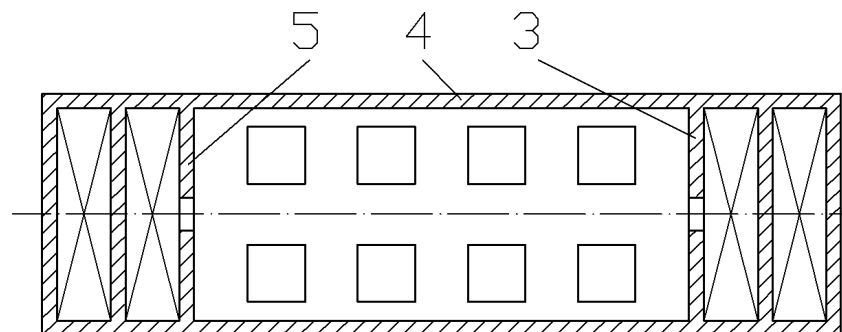
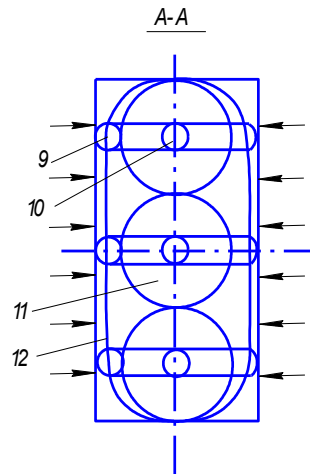
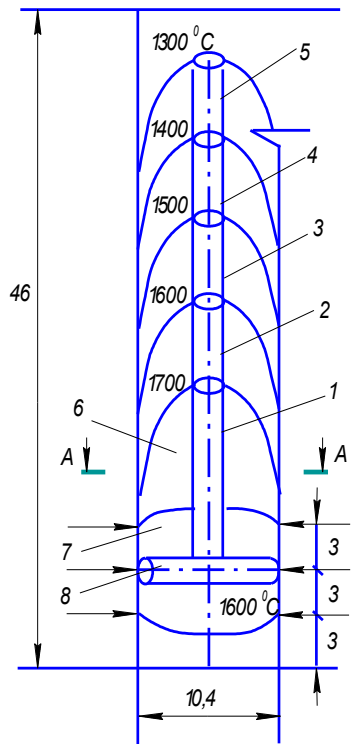
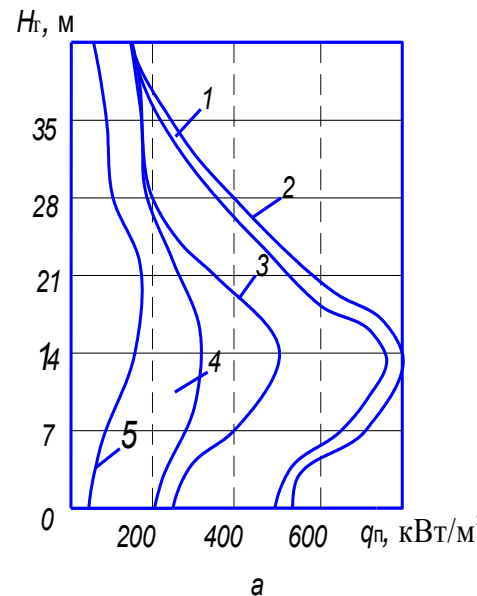


Схема регенеративного нагревательного колодца с верхним и нижним факелами

Пример расчета теплообмена по законам теплового излучения газовых объёмов в топке парового котла энергоблока мощностью 800 МВт.



Конструкция топки ПК не изменялась в течение длительного времени.



- 1 – по вертикальной оси симметрии фронтальной стены;*
- 2 – то же, результат измерений;*
- 3 – по вертикальной оси симметрии боковой стены;*
- 4 – по вертикальной оси на периферии боковой стены;*
- 5 – по вертикальной оси на периферии фронтальной стены*

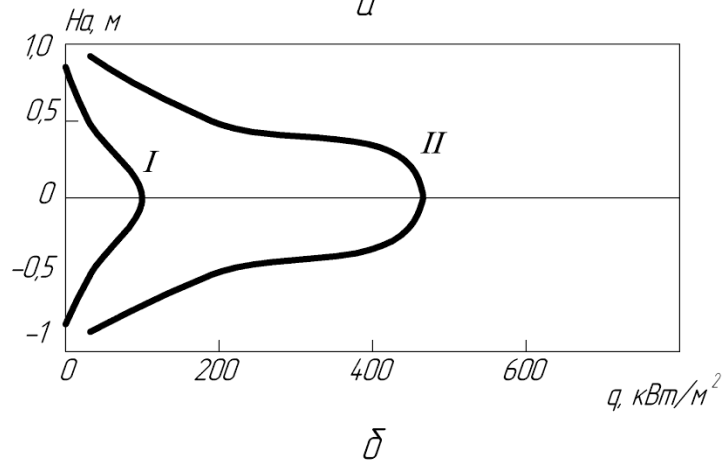
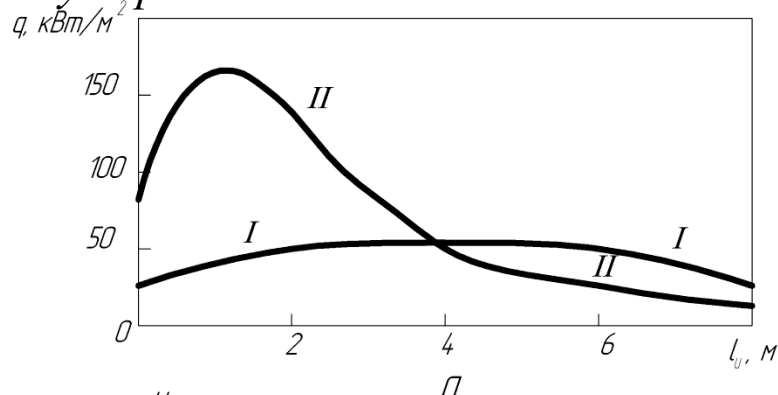
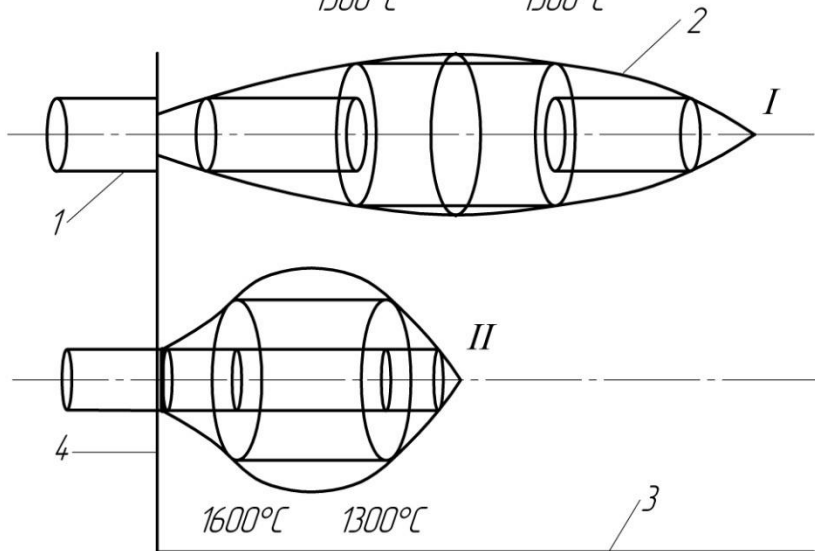
Распределение изотерм в топке парового котла ТГМП-204

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

*Экспериментальное подтверждение в сообщении на РНКТ-4 профессорами кафедры «Котельных установок и экологии» НИУ МЭИ расчетных данных.
 Патент на изобретение: наклон внутрь задней стены на 6°.*

Пример расчета по законам теплового излучения газовых объемов теплового излучения

1500°C факела на горелочное устройство
1300°C 1300°C



Расположение факела в печи
 $L_{\phi 1} = 8 \text{ м}$, $l_{\phi 2} = 3 \text{ м}$, $P_{\phi} = 5 \text{ МВт}$

Распределение тепловых потоков от факела по горизонтальной поверхности нагрева (а) и по поверхности амбразуры (б)

Экспериментальное подтверждение расчетных

данных на ТЭЦ-21, ТЭЦ 23 Моэнерго,

Конаковской ГРЭС

Патенты на изобретения:

I-IV – способы нагрева изделий в факельных печах.

Расчет тепловых потоков от факела на корпус летательных аппаратов

Пример расчет теплообмена в КС ГТУ по законам теплового излучения газовых объёмов

ГТ – 4,25 МВт, $P_{\phi} = 16,28$ МВт

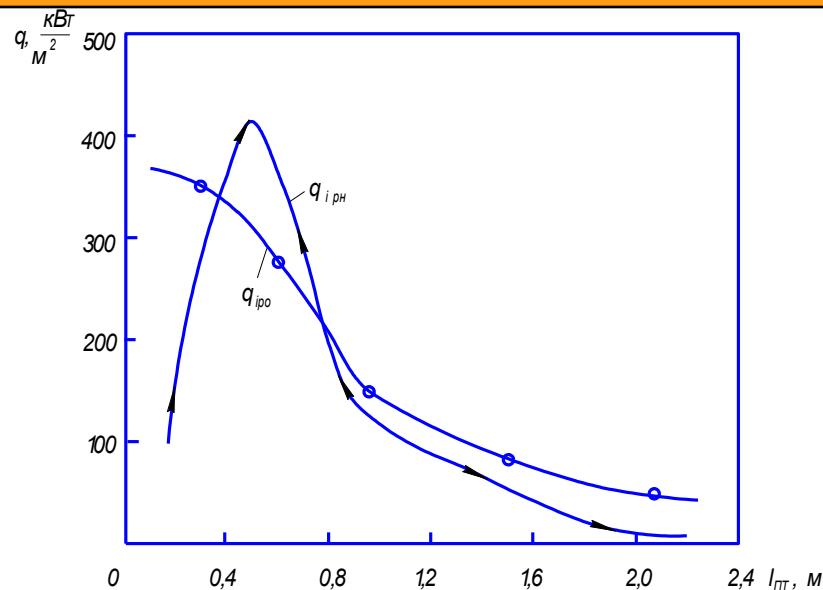
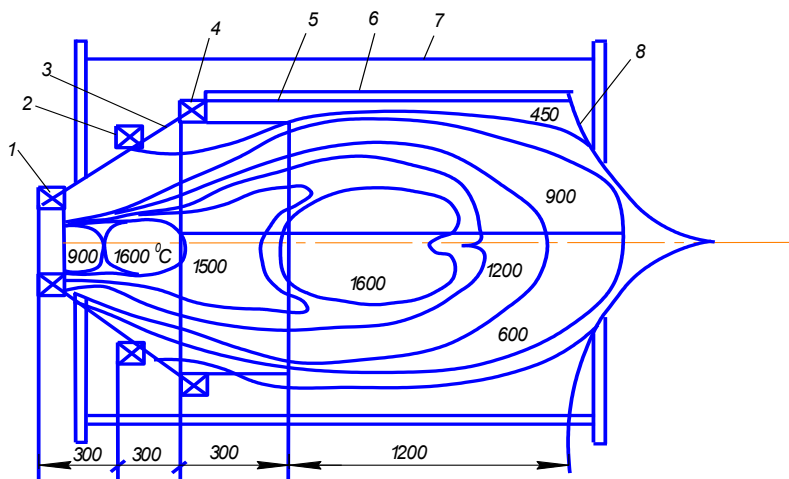


Схема камеры сгорания и распределения изотерм по объему факела

Графики распределения плотностей потоков нагрева и охлаждения по длине пламенной трубы

На создание ГТД уходит 8-10 лет. При разработке двигателя АЛ-31Ф для истребителя СУ-27 при испытаниях было создано и разрушено 50 полноразмерных опытных экземпляров. Затраты на создание двигателя составили 3,5 млрд. долларов.

Спасибо за внимание!

410 научных трудов

8 монографий

9 учебников

научное открытие

27 патентов на изобретения

