

# Модернизация печей с нагревательными излучающими трубами

*Доктор техн. наук Йоахим Г. Вюннинг*

*WS Thermal Process Technology Inc., Elyria, Ohio*

## **Введение**

Существует множество причин, по которым решают искать альтернативные системы излучающих труб для существующих печей. На рынке также существует множество вариантов радиантных излучающих труб от различных производителей. Для выбора наилучшего решения требуется детальный анализ существующих печей, глубокие знания оборудования горелок и протекающих процессов, а также творчество для поиска экономического решения, которое не отразится негативно на технических характеристиках оборудования. Следующие примеры должны дать представление о многообразии вариантов и способов решений. Примеры относятся к проектам по модернизации, но многие мысли относятся также к применению нового оборудования без его изменения.

## **Типы радиантных излучающих труб**

На рынке представлены излучающие трубы в различных видах исполнения и наиболее часто встречающиеся из них показаны на рисунке 1. Прямые, U-образные трубы и герметичные трубы-оболочки выполняются не только из специальных легированных сплавов, но также из керамики, преимущественно химически связанного SiSiC. Доля рынка керамических излучающих труб растет сейчас быстро. Радиантные трубы из керамики, хрупкие, но стойкие и успешно сопротивляющиеся воздействию высоких температур и тепловых ударов, имеет хорошую прочность даже при высоких

температурах. Типы излучающих труб и их характеристики были рассмотрены более детально в предыдущей статье в *Industrial Heating* /1/.

### **Проекты по модернизации**

Проекты по модернизации печей редко выполняются только из компонентов, поставляемых по каталогу, обычно они происходят при тесном сотрудничестве заказчика и поставщика. Проекты по модернизации проводятся производителями печей, поставщиками горелок, машиностроительными фирмами или при их совместной работе, в зависимости от размера и сложности проекта.

Начальной точкой модернизации обычно является:

- анализ существующего оборудования
- определение задач и
- конечное рассмотрение вариантов.

Часто анализ существующего оборудования выявляет возникающие проблемы и в некоторых случаях решением может быть незначительная модификация оборудования.

В большинстве случаев, очень полезно сделать полный тепловой баланс процесса.

Такие данные как:

- норма производства
- потребление топлива
- геометрия печи
- температурные зоны и выходы
- и другие данные

очень помогают при правильном определении действительной ситуации. После обсуждения задачи и усовершенствований, которые должны быть достигнуты, может быть вновь проведен предполагаемый тепловой баланс, для того, чтобы увидеть условия работы оборудования после возможной модификации. Рисунок 2 показывает

результаты теплового баланса печи непрерывного действия. Красная линия показывает увеличение температуры металлической ленты. Нагрев происходит в первых четырёх зонах, пятая зона - это зона выдержки. Голубая линия отражает полезную теплоподачу и указывает, что горелки в первых двух зонах производят 100%-й нагрев, который снижается в зонах с третьей по пятую. Зелёная линия показывает температуру излучающей трубы, которая растёт до конца второй зоны. Затем в температуре излучающей трубы наступает граничный фактор и излучающие свойства трубы соответственно снижаются. Из такого расчёта можно определить граничные факторы, например, для производственной нормы.

Более подробно рассмотрим вопрос расположения трубы. Очевидно, что температура вокруг излучающей трубы неоднородна, но этим фактом часто пренебрегают. Сторона трубы, обращенная к стене значительно горячее, чем сторона, обращенная к нагреваемому материалу, особенно, когда трубы располагаются слишком близко друг от друга, (см. рис. 3). Эти условия могут быть проверены специально предназначенными программами, которые имеются у некоторых производителей печей и горелок. Для более детального изучения печи можно использовать программное обеспечение CFD (вычисление газодинамики) (см. рис. 4). Эта программа общего назначения позволяет получить полную трёхмерную симуляцию печи. Однако, эта программа требует большого опыта и, в зависимости от сложности задания, большой мощности компьютера и долгое время для обработки данных. В последние годы большой прогресс был достигнут благодаря дружественному интерфейсу и, определенно, подобные программы будут играть всё большую роль в будущем.

Кроме общего размещения оборудования, должны быть обсуждены другие проблемы, такие как: управление горелками, контроль горения, трубная разводка. Новые стандарты передачи данных, такие как последовательная полевая шина “Profi-Bus”

позволяют добавлять выполняемые функции без необходимости использования тысяч проводов около печи.

### **Пример: Преобразование прямооточных труб**

Первым примером преобразования является печь с установленными прямооточными трубами. Основная причина для модернизации была реорганизовать проектную мощность печи. Изначально печь достигала своей проектной мощности, но производственная мощность уменьшалась с течением времени главным образом по следующим двум причинам:

- горелки были не настроены
- радиантная труба не обслуживалась (срок службы трубы)

Когда планируется модификация, рассматривались также другие аспекты:

- увеличение эффективности
- снижение выбросов в атмосферу
- увеличение безопасности горения

Другим требованием было минимизировать время простоя, необходимое при модернизации. Исходя из нескольких вариантов и учитывая все технические, эксплуатационные и экономические требования, пришли к следующему решению.

Существующие излучающие трубы могли бы быть использованы повторно во избежание значительных структурных работ в печи и снижения инвестиций. Как это показано на рис. 5, дизайн был принципиально изменен от прямооточного нагрева к закрытой трубе-оболочке с рециркуляцией, введя керамические внутренние сегменты трубы и закрыв также одну сторону излучающей трубы. Если убрать второе отверстие трубы в печи, то труба сможет свободно расширяться и печь будет полностью герметичной.

Энергосбережение в пределах 30% по сравнению с техническими данными первоначального исполнения было достигнуто благодаря использованию рекуперативных горелок. Реальное энергосбережение было, однако, существенно выше, поскольку многие горелки не могли быть настроены на правильное соотношение газовой смеси перед тем, как произошла модернизация.

Система управления с пропорциональной зоной была заменена последовательной импульсной системой горения. Затем каждая система излучающих труб была оборудована воздушным и газовым селеноидным клапаном, электродом зажигания, системой контроля горения и устройством контроля горелки. Кроме того, улучшилась точность установки температуры, температурная однородность и снизился выброс  $\text{NO}_x$ , операция включения/выключение горелок предотвращает остановку всей зоны, в случае, если один датчик пламени фиксирует сбой пламени. Система управления позволяет теперь охладить индивидуально каждую отдельную температурную зону печи простым открытием вентиля подачи воздуха горения каждой горелки. Настройка горелки облегчилась, как только появилась возможность настраивать каждую горелку индивидуально, просто используя манометр для проверки дифференциального давления воздуха и топлива на измерительной диафрагме и используя анализатор выхлопных газов во время начального запуска.

Требуемое время простоя было коротким, поскольку поставляемые горелки были уже поставлены с трубной обвязкой и проверены. Трубы газа, воздуха и отходящих газов были модифицированы для достижения постоянного давления на каждой горелке. Старую систему подачи воздуха можно использовать, в случае, если уровень и характеристика давления соответствует требованиям новой системы.

После модификации проектная мощность была легко достигнута и оставалась неизменной. Срок службы излучающей трубы был значительно увеличен, в основном из-за однородности температуры и исключения напряжений, поскольку труба смогла

теперь свободно расширяться внутри печи. Другим преимуществом было снижение температуры вокруг печи, низкая температура отходящих газов.

### **Пример: Замена W-трубы P-трубой**

Недостаточный срок службы оборудования и высокие расходы на техническое обслуживание были причинами развития концепции замены W-трубы в печи. После оценки различных вариантов, были выбраны P-трубы с диаметром более 10 дюймов (см. рис. б). Кроме того, что они имеют большую крестовину для внутренней рециркуляции, у труб присутствует более высокая структурная прочность в сравнении с трубами с малым диаметром. Изменения в концепции управления были незначительны, поскольку ранее установленные трубы управлялись по принципу «повышение/снижение». Были добавлены вентилятор подачи воздуха для горения и трубная обвязка для изменения системы. Всасывание (отрицательное давление в системе дымоудаления, без вентилятора подачи воздуха горения) было заменено на подачу-всасывание (отрицательное давление в системе дымоудаления и положительное давление в системе подачи воздуха для горения).

### **Пример: Замена трубы из сплава герметичной керамической излучающей трубой-оболочкой**

Третий пример демонстрирует возможность увеличения производительности линии по выпуску жести на значительно большую производительность, чем указанная в техническом условии изготовителя печи. Задачей было исследовать ресурсы для увеличения нормы производства печи без увеличения длины печи. Для того чтобы решить эту задачу, металлическая полоса должна была быть нагрета на более коротком

участке зоны нагрева, поскольку норму охлаждения нельзя было изменить из-за особенностей металлургической обработки. Печь была оборудована рекуперативными горелками с высоким КПД, управляемых в режиме «включить/выключить» и установленных в герметичную металлическую излучающую трубу-оболочку.

После тщательного изучения было выяснено, какое количество подводимого тепла и в каких температурных зонах требуется для выполнения необходимой теплопередачи к полосы металла с низким коэффициентом излучения. Расчеты показали, что задачу можно было бы выполнить, заменив металлические трубы керамическими SiSiC трубами. Внутренние жаровые трубы уже были керамическими и могли быть использованы повторно. Горелки были оснащены керамическими рекуператорами, которые выдерживают более высокие температуры отходящих газов. Для борьбы с возрастающим выбросом  $\text{NO}_x$  из-за более высокой температуры трубы и предпрогрева воздуха для горения, горелка могла бы также работать в режиме окисления без пламени (FLOX<sup>®</sup> - зарегистрированная торговая марка фирмы WS GmbH, Germany). Первоначальные сомнения, выдержат ли трубы в случае обрыва ленты, были развеяны установкой нескольких экспериментальных труб во всей печи и, после определенного промежутка времени, проект был одобрен. Как только излучающими трубами в подобном исполнении и концепцией управления были заменены ранее установленные, изменения обшивки печи, трубной разводки, вентиляторов и системы управления печи были незначительны, и потребовали очень короткого времени простоя (см. рисунок 7). Используя данные анализов, наивысшая производительность была достигнута почти сразу после модернизации. Особенности потребления энергии остались почти такими же, как были с тех пор, когда началась использоваться система предпрогрева воздуха. Несколько снизившаяся излучательная способность (действительный нагрев) системы излучающих труб из-за более высокой температуры отходящих газов было вознаграждено снижением специфических потерь стенок печи. Выброс  $\text{NO}_x$  смог быть

снижен несмотря на повышенные температурные зоны печи применением FLOX<sup>®</sup> технологии. Средства, которые удалось сберечь, избегнув удлинения печи, были существенными.

## **Вывод**

Изменение среды деловой активности требует постоянного усовершенствования оборудования, для того чтобы оставаться конкурентноспособным. В течении последних лет, возможности горелок нового вида, концепции излучающих труб и материалов излучающих труб были успешно продемонстрированы в “полевых” условиях. В настоящее время на рынке представлены электронное управление и новые стандарты передачи данных, такие, например, как последовательная полевая шина «Profī-Bus».

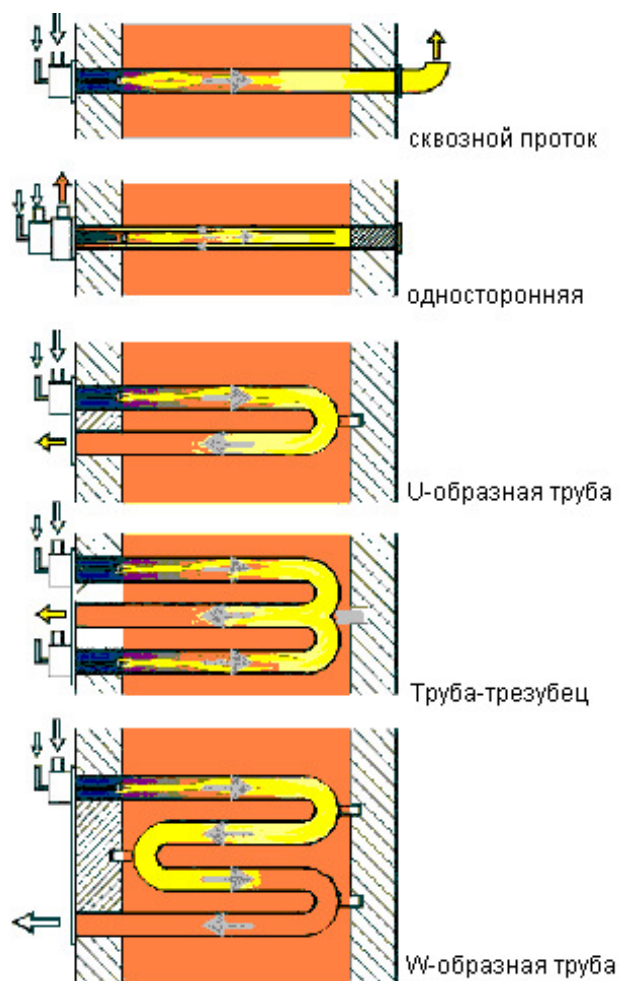
В будущем, когда растущие цены на энергоносители потребуют всё более эффективных систем, пригодятся тщательно разработанные системы регенерации, которые уже сейчас прошли испытания. Многообразие видов систем, а также методов изучения решений модернизации будут постоянно расти в зависимости от всё более сложных математических инструментов, которые смогут предсказать эксплуатационные качества модернизируемого оборудования.

## **Литература**

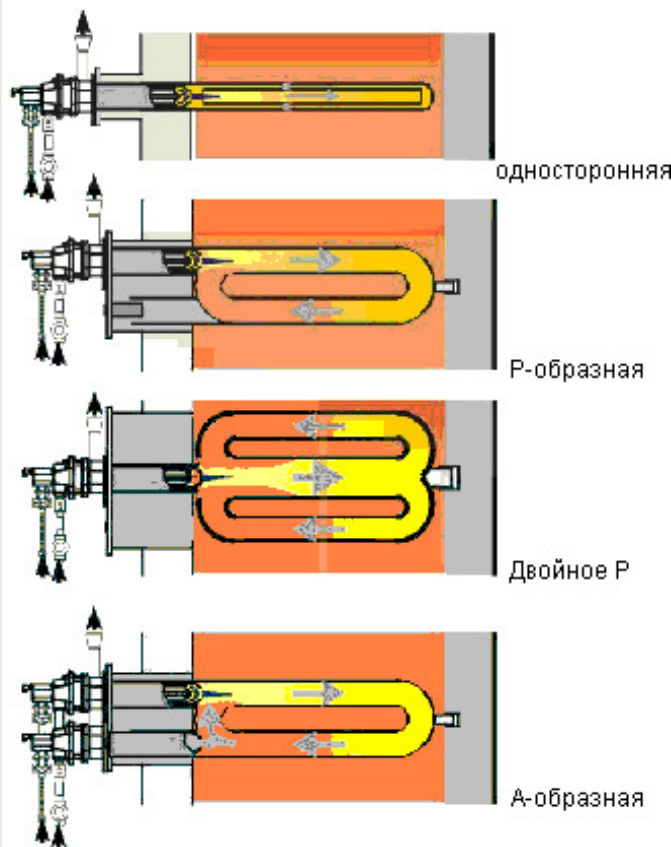
- /1/ Ceramic Radiant Tubes Extend Performance Limits, Wuenning J., Industrial Heating, March 2002
- /2/ Burners for Flameless Oxidation, Wuenning J., Industrial Heating, November 1995



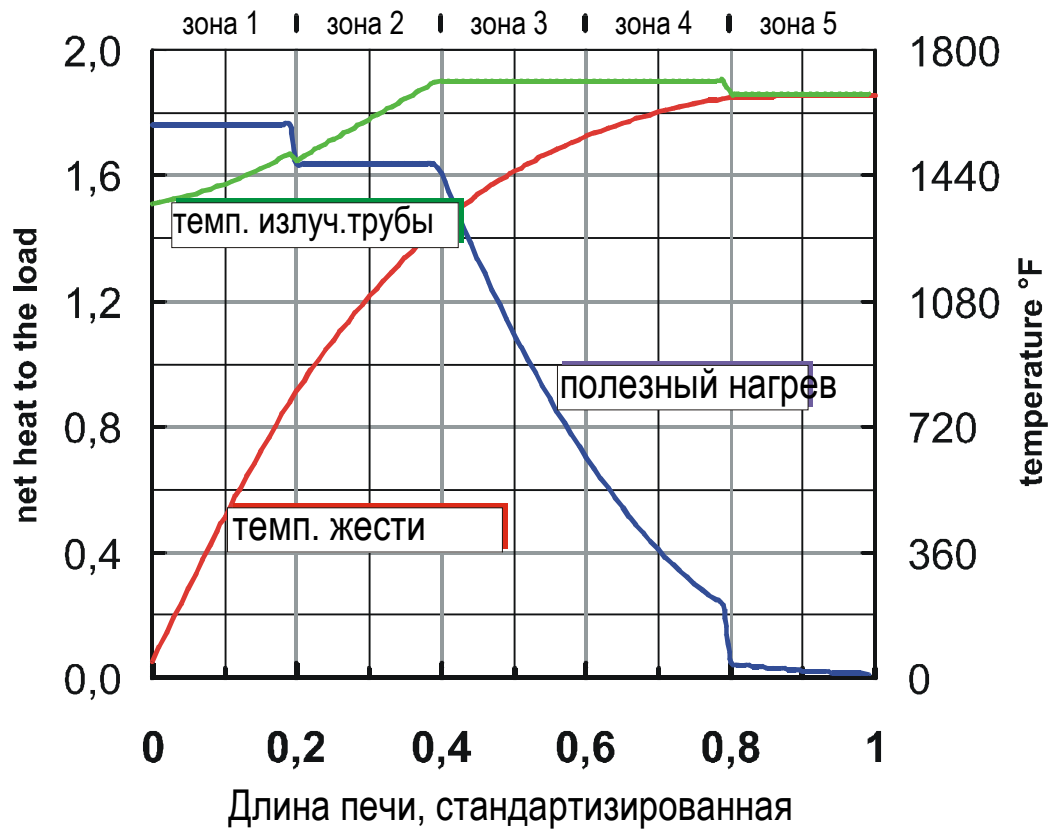
**без рециркуляции**



**с рециркуляцией**



**Рисунок 1:** Различные стили исполнения излучающих труб (Использован рисунок из статьи в ИЖ 2002)



**Рисунок 2:** Расчет теплопередачи для печи непрерывного действия

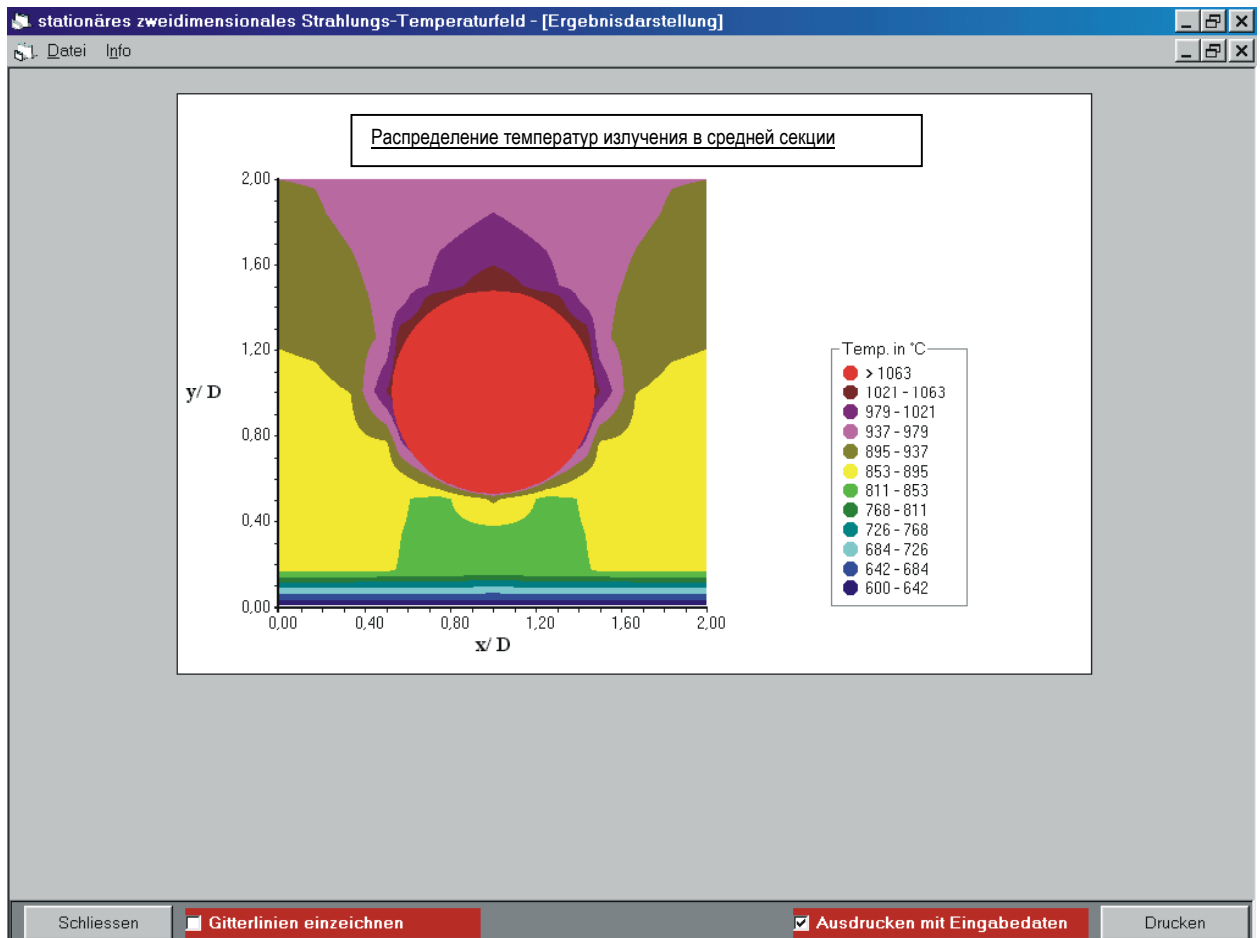


Рисунок 3: Тепловое излучение вокруг излучающей трубы

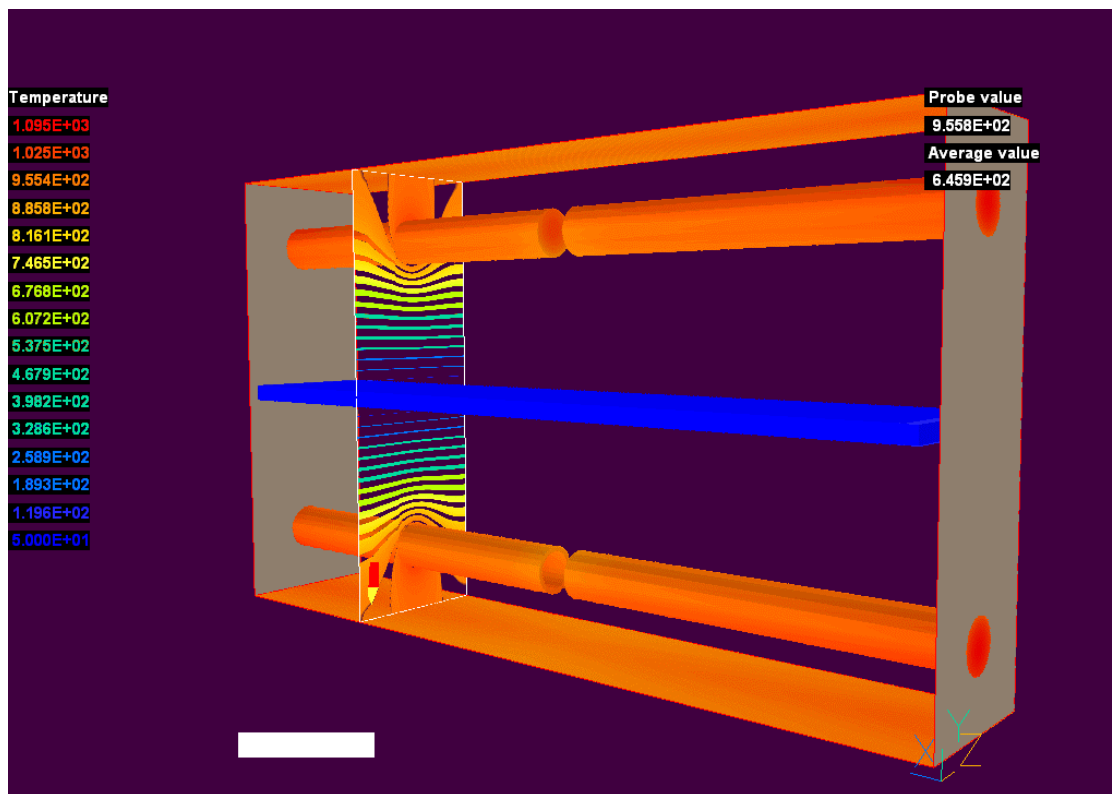


Рисунок 4: CFD симуляция печи, нагреваемой излучающими трубами

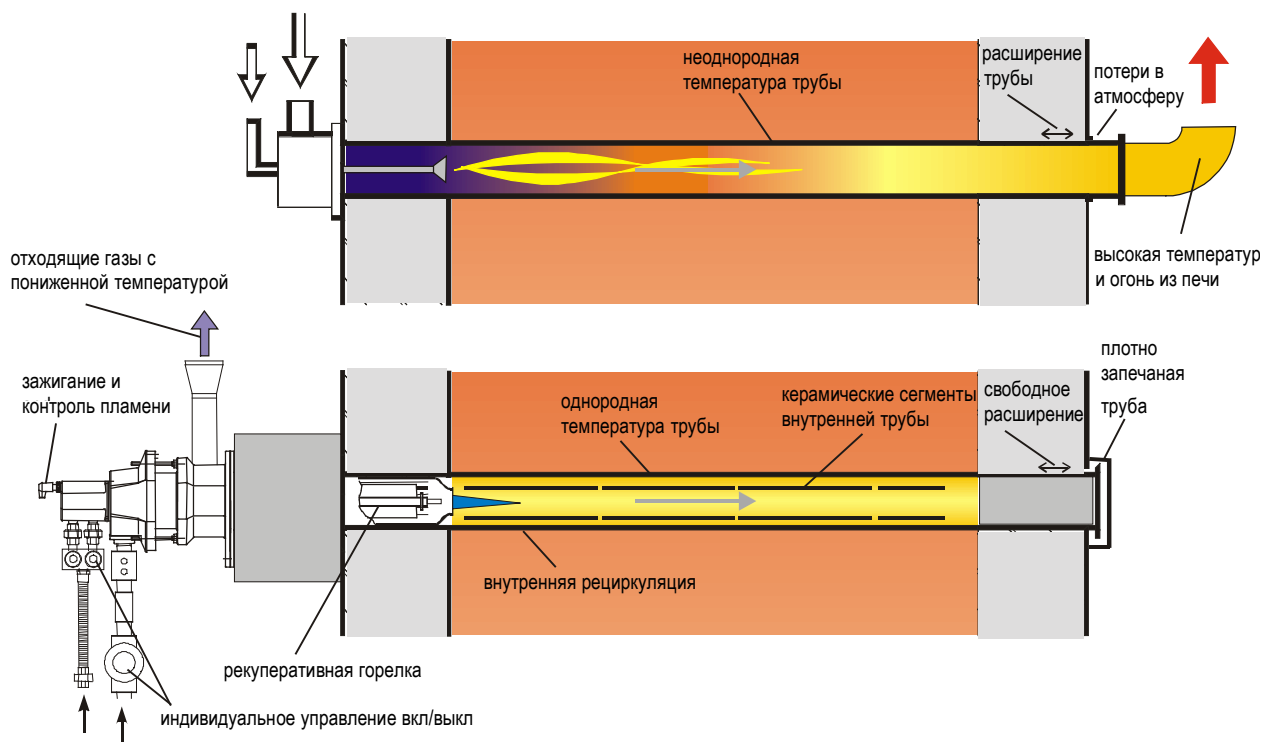
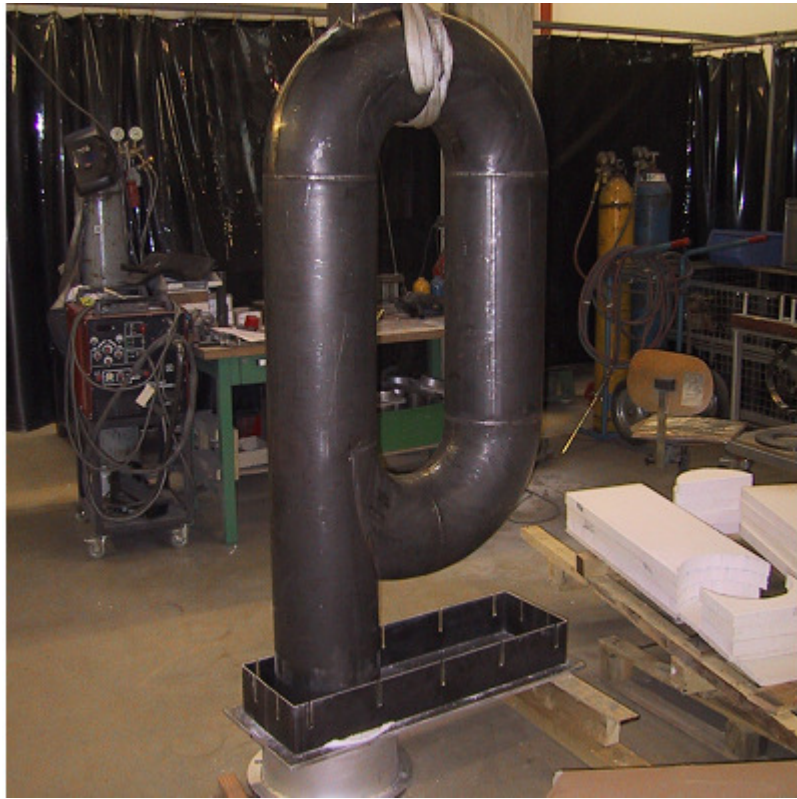


Рисунок 5: Замена прямооточной излучающей трубы герметичной излучающей трубой



**Рисунок 6:** Р-образная труба



**Рисунок 7:** Горелки с SiSiC излучающими трубами, расположенные в горизонтальной линии по отжигу кремнесодержащей металлической ленты