

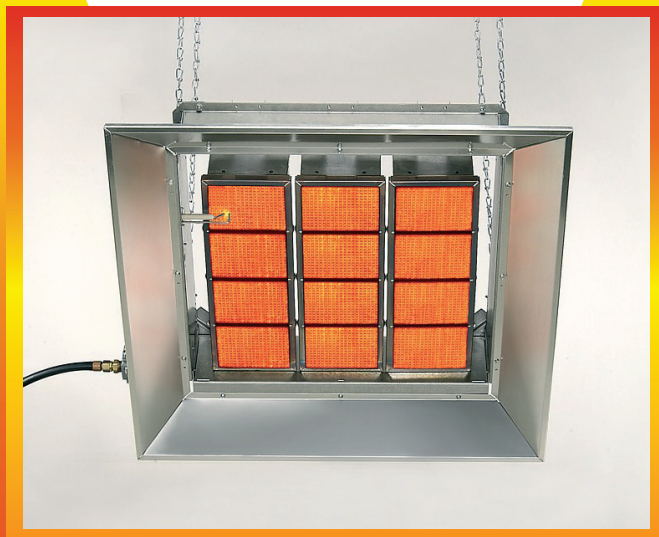
**В.Н. Пелипенко, Д.Ю. Слесарев**

---

# **ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

---

**Учебное пособие**



---

**Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012**

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Архитектурно-строительный институт  
Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

В.Н. Пелипенко, Д.Ю. Слесарев

**ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ  
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Учебное пособие

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012

УДК 662.951.2(075.8)

ББК 38.762.1я73

П246

Рецензенты:

к. т. н., профессор Пензенского государственного университета  
архитектуры и строительства *С.Г. Прохоров*;

к. т. н., доцент Тольяттинского государственного университета  
*М.Н. Кучеренко*.

Научный редактор к. т. н., доцент *О.А. Сизенко*.

**П246** Пелипенко, В.Н. Газовые горелки инфракрасного излучения : учеб. пособие / В.Н. Пелипенко, Д.Ю. Слесарев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. – 118 с. : обл.

В учебном пособии дан обзор развития устройств горелок инфракрасного излучения. Приведено сравнение горелок «светлого» и «темного» типа. Рассмотрены достижения и перспективы использования горелок инфракрасного излучения в хозяйственной деятельности. Изложены и проанализированы результаты теоретического и экспериментального исследования горелки с прозрачным экраном.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавра 270800.62 «Строительство» (профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция»), всех форм обучения.

УДК 662.951.2(075.8)

ББК 38.762.1я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2012

## Условные обозначения

- $t, T$  – температура, °С, К;  
 $Q$  – тепловой поток, Вт, расход, м<sup>3</sup>/ч;  
 $q$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $c$  – массовая теплоемкость, кДж/(кг·°С), объемная концентрация, мг/м<sup>3</sup>, скорость распространения электромагнитных колебаний, м/с;  
 $G$  – массовый расход, кг/с;  
 $V$  – объем, м<sup>3</sup>;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), коэффициент избытка воздуха;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), длина волны, мкм;  
 $F$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $v$  – скорость, м/с;  
 $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  
 $h$  – высота, м;  
 $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  
 $\varphi$  – коэффициент облученности;  
 $\varepsilon$  – степень черноты;  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия, %;  
 $\beta$  – угол наклона к горизонту, °;  
 $m$  – масса, кг;  
 $P$  – давление, Па;  
 $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $\delta$  – диаметр, мм;  
 $\sigma$  – приведенная степень черноты системы;  
 $B$  – барометрическое давление, мм рт. ст.;  
 $s$  – относительная плотность;  
 $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  
 $u$  – коэффициент эжекции.

## Индексы

- min – минимум;  
max – максимум;  
г – газ; горелка;

п – помещение, приток;  
в.к. – всасывающая камера;  
эж – эжектор;  
изл – излучатель, излучение;  
сет – сетка;  
в – воздух;  
см – смесь;  
с – сопло;  
и – тепло в виде излучения;  
п – потери;  
ух – уходящие продукты сгорания;  
о.э – отверстие в экране;  
кер – керамический излучатель;  
корп – корпус;  
кан – каналы;  
к – конвекция;  
экр – экран;  
перег – перегородки каналов.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широко применяется автономное (децентрализованное) теплоснабжение от источников, расположенных вблизи объектов теплопотребления. Однако автономные системы с промежуточным теплоносителем (вода) имеют ряд недостатков. Поэтому предложено использовать автономные системы лучистого отопления с газовыми инфракрасными обогревателями, которые размещаются непосредственно в отапливаемых помещениях большого объёма. Тепловое излучение от инфракрасных излучателей не поглощается воздухом, поэтому вся энергия без потерь достигает обогреваемых поверхностей и людей. Лучистое отопление считается наилучшим и с санитарно-гигиенической точки зрения вследствие более глубокого проникновения лучистого тепла в организм человека и равномерного распределения температуры воздуха по вертикали помещения. Лучистые системы отопления обеспечивают получение КПД до 80% при организованном отводе продуктов сгорания и до 100% при поступлении продуктов сгорания в отапливаемое помещение. Системы лучистого отопления на базе инфракрасных излучателей позволяют добиться экономии затрат на отопление, по сравнению с традиционными системами.

Федеральный закон «Об энергосбережении» № 28-ФЗ поставил задачи по снижению энергопотребления. В сфере отопления эту проблему успешно решают системы лучистого газового обогрева.

В соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005-88, СНиП 42-01-2003, СТО НП «АВОК» «Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями» и ППБ 01-03 «Правила пожарной безопасности в Российской Федерации» автономные системы газоздушного отопления с газовыми инфракрасными излучателями наиболее подходят для обогрева таких объектов как производственные и вспомогательные помещения, выставочные помещения, ангары, магазины и торговые центры, теплицы, помещения для содержания скота и птицы, крытые спортивные арены, погрузочные площадки и т. п.

Выгодно применение лучистого инфракрасного отопления для помещений, функционирующих относительно короткое время

– спортивные манежи, теннисные корты, частично защищенные от ветра монтажные участки, спортивные трибуны, террасы, кафе и т. д.

Инфракрасные горелки применяются также для сушки зданий и помещений при отделочных работах, местной подсушке при производстве ремонтных работ, прогрева мерзлого грунта при земляных работах, разогрева асфальтобетона при дорожных работах и т. п.

Биологическое действие инфракрасного радиационного отопления благоприятно для человека. При лучистом отоплении тело человека отдаёт большую часть избыточного тепла путём конвекции окружающему воздуху, имеющему более низкую температуру, чем тело. Такая форма теплоотдачи действует освежающе и благоприятно влияет на самочувствие.

Применение лучистых систем отопления сдерживается тем, что нормативная база для расчёта и проектирования систем отсутствует или не соответствует современному техническому уровню. Требуется провести экспериментальные исследования для определения оптимальных условий сжигания газа и обеспечения требуемых санитарно-гигиенических показателей в отапливаемых помещениях.

В России созданы все условия для широкого внедрения энергосберегающих, автономных систем лучистого газового отопления на базе отечественных инфракрасных излучателей.

# 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

---

## 1.1. Инфракрасное излучение

Инфракрасное излучение было обнаружено в 1790 году М. Питке и позднее вторично в 1860 году В. Гершелем, который наблюдал повышение показаний термометра, помещенного за красной полосой солнечного спектра. Инфракрасная область спектра была открыта Уильямом Гершелем в 1800 году. На протяжении XIX века шло исследование этой области спектра. В начале XX века окончательно сформировалось представление об инфракрасной области шкалы электромагнитных излучений.

Излучение энергии у тепловых источников происходит в широком диапазоне частот электромагнитных волн. По современным представлениям, инфракрасное излучение, подобно свету, обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Распространение электромагнитной волны в пространстве сопровождается переносом энергии по направлению движения волны.

Любое электромагнитное колебание описывается с помощью волновых или квантовых параметров. Волновые параметры – частота  $\nu$ , длина волны  $\lambda$  и  $c$  – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме связаны между собой соотношением

$$\nu = c / \lambda. \quad (1.1)$$

Квант энергии электромагнитного поля называется фотоном, энергия кванта излучения  $Q$  связана с частотой излучения следующим образом:

$$E = h \cdot \nu, \quad (1.2)$$

где  $h = 6,62517 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка.

Рис. 1.1 иллюстрирует положение инфракрасного спектра в общем спектре электромагнитных колебаний.

Каждый участок спектра связан с определенными процессами и физикой явлений. Границы диапазонов не являются абсолютными, и методы генерирования или приема обычно перекрывают условные рубежи.





Рис. 1.1. Положение инфракрасного спектра в общем спектре электромагнитных колебаний

Нижний предел инфракрасной области лежит у длинноволновой границы чувствительности человеческого глаза  $\sim 0,77$  мкм, верхний  $\sim 340 \div 1000$  мкм. На рис. 1.2 представлена инфракрасная область спектра от 0,7 до 1000 мкм с условным делением на коротковолновую, средневолновую и длинноволновую области спектра.

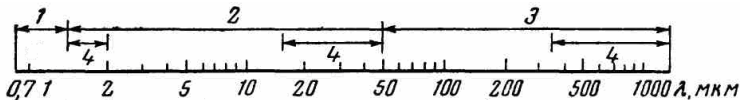


Рис. 1.2. Инфракрасная область спектра: 1 – коротковолновая область; 2 – средневолновая область; 3 – длинноволновая область; 4 – переходные области

Инфракрасные лучи обладают такими же оптическими свойствами, как видимые и ультрафиолетовые, то есть распространяются прямолинейно, преломляются и поляризуются. Когда лучистый поток падает на поверхность тела, одна часть потока отражается, другая проходит сквозь тело и в зависимости от его коэффициента преломления изменяет свое направление, третья часть целиком поглощается телом. Отражательная способность тела (коэффициент отражения)  $r$  характеризуется отношением отраженной телом лучистой энергии к падающей энергии. Пропускная способность тела (коэффициент пропускания)  $d$  характеризуется отношением пропущенной телом лучистой энергии к падающей энергии. Поглощательная способность тела (коэффициент поглощения)  $a$  характеризуется отношением поглощенной телом лучистой энер-

гии к падающей энергии. Если вся лучистая энергия, падающая на тело, поглощается им, то такое тело принято называть абсолютно черным. Когда вся лучистая энергия, падающая на тело, отражается им, то такое тело принято называть абсолютно белым. Если лучистая энергия, падающая на тело, проходит через него, то такое тело называется абсолютно прозрачным.

В природе нет абсолютно черных, белых и прозрачных тел. Поэтому соотношения между  $a$ ,  $r$  и  $d$  зависят от вида тел, характера их поверхности и температуры. Реальные тела отражают, поглощают и пропускают излучение чаще всего избирательно, по-разному для разных длин волн. Многие вещества, прозрачные в видимой области, оказываются непрозрачными в некоторых областях инфракрасного излучения и наоборот.

Ряд веществ, даже в толстых слоях (несколько сантиметров), прозрачен в достаточно больших участках инфракрасного спектра. Из таких веществ изготавливаются различные оптические детали (призмы, линзы, окна и пр.) инфракрасных приборов. Например, стекло прозрачно до 2,7 мкм, кварц — до 4,0 мкм и от 100 до 1000 мкм.

Для поглощения и отражения инфракрасных лучей большое значение имеет состояние поверхности тела. Отражательная способность у гладких и полированных поверхностей во много раз выше, чем у шероховатых.

Наибольшей поглощательной способностью обладают тела, покрытые платиновой чернью или сажей. Белые поверхности хорошо отражают видимые световые лучи и практически полностью поглощают инфракрасные.

У большинства металлов отражательная способность для инфракрасного излучения значительно больше, чем для видимого света, и возрастает с увеличением длины волны инфракрасного излучения. Например, коэффициент отражения Al, Au, Ag, Cu при  $\lambda = 10$  мкм достигает 98%.

Азот и кислород воздуха не поглощают инфракрасное излучение и ослабляют его лишь в результате рассеяния. Пары воды, углекислый газ, озон и другие примеси, имеющиеся в атмосфере, селективно поглощают инфракрасное излучение. Наличие в атмосфере взвешенных частиц — дыма, пыли, мелких капель воды

(дымка, туман) — приводит к дополнительному ослаблению инфракрасного излучения в результате рассеяния его на этих частицах, причём величина рассеяния зависит от соотношения размеров частиц и длины волны инфракрасного излучения.

## **1.2. Классификация инфракрасных излучателей**

Источниками излучения являются любые материальные системы, излучающие электромагнитные волны. Один из способов генерирования инфракрасного излучения заключается в повышении температуры тела, выбранного в качестве излучателя. Нагретые твёрдые тела испускают непрерывный спектр. В зависимости от температуры и состояния поверхности тело испускает то или иное излучение. При низких температурах (ниже  $500^{\circ}\text{C}$ ) излучение нагретого твёрдого тела почти целиком расположено в инфракрасной области, и такое тело кажется тёмным. С повышением температуры доля излучения в видимой области увеличивается, и тело вначале кажется тёмно-красным (при  $700^{\circ}\text{C}$ ), затем красным (при  $900^{\circ}\text{C}$ ), жёлтым (при  $1100^{\circ}\text{C}$ ) и, наконец, при высоких температурах (выше  $1400^{\circ}\text{C}$ ) — белым. При этом возрастает как полная энергия излучения, так и энергия инфракрасного излучения.

Тепловым излучением называется процесс превращения тепловой энергии тела в лучистую энергию. Именно излучение нагретых тел является распространённым и наиболее важным при теплообмене. В отличие от теплопроводности и конвекции, теплообмен излучением происходит при отсутствии прямого контакта и в значительной мере зависит от температурного уровня процесса. Теплообмен излучением сопровождается переходом тепловой энергии в энергию электромагнитных колебаний. При поглощении энергия электромагнитных колебаний вновь частично или полностью превращается в тепловую энергию.

Лучистые приборы отличаются от конвективных прежде всего своей конструкцией, благодаря которой доля лучистой теплоотдачи становится преобладающей. Лучистый КПД определяется отношением мощности, испускаемой в виде излучения в окружающее пространство (в полном пространственном угле распределения излучения), к тепловой мощности излучателя.

В общем случае инфракрасный излучатель состоит из двух основных элементов: 1 – элемента, испускающего излучение; 2 – элемента, направляющего излучение в заданном направлении. Элемент излучателя, испускающий излучение, называется телом излучателя и имеется только в температурных излучателях. Тело накала может быть электрическим или газовым.

Электрическое тело накала представляет собой нагревательную спираль (открытое тело накала), которая может быть окружена конструкцией (например, трубкой), пропускающей излучение.

Газовое тело накала представляет собой металлический элемент (трубка, пластинка) или керамический элемент (перфорированная плитка, чаша и т. п.), нагреваемый до определенной температуры путём сгорания газа.

Элемент, направляющий излучение в заданном направлении, может быть двоякого рода: 1 – элемент, испускающий излучение во все стороны пространства, в полусферу, в единственном направлении; 2 – отражатель, отражающий излучение, испускаемое излучающим элементом в направлении определенного пространственного угла.

Очень часто применяется разделение излучателей на «темные» и «светлые».

**Темные излучатели** – излучатели, в которых доля видимого излучения в испускаемом спектре не превышает доли процента. Максимальная температура тела накала темного излучателя не превышает  $600^{\circ}\text{C}$ .

**Светлые излучатели** – излучатели с температурой тела накала свыше  $600^{\circ}\text{C}$ , в которых количественная доля видимого излучения в испускаемом спектре может достигать даже до нескольких десятков процентов.

Вместо температурного критерия часто применяется связанный с ним критерий максимальной длины волны  $\lambda_{\max}$  испускаемого телом накала излучения. В связи с этим принято разделять излучатели на три группы: 1) коротковолновые излучатели ( $\lambda_{\max} \leq 2 \text{ мкм}$ ), 2) средневолновые излучатели ( $2 \text{ мкм} < \lambda_{\max} < 4 \text{ мкм}$ ) и 3) длинноволновые излучатели ( $\lambda_{\max} \geq 4 \text{ мкм}$ ).

К коротковолновым излучателям относятся газоразрядные, дуговые лампы, электрические дуги, лампы накаливания, ламповые

инфракрасные излучатели и газовые инфракрасные излучатели с открытым пламенем. К средневолновым излучателям — электрические излучатели с неэкранированным телом накала — металлическим или неметаллическим, а также газовые беспламенные излучатели с наружным сгоранием и большинство излучателей с внутренним сгоранием. К длинноволновым излучателям — электрические инфракрасные излучатели с керамической или металлической излучающей оболочкой и некоторые газовые излучатели с закрытым пламенем.

Все излучатели разделяются на две основные группы:

- 1) излучатели обогревающие, т. е. применяемые для обогрева живых существ (например, в животноводстве или птицеводстве), в терапии и т. п.;
- 2) излучатели нагревающие, т. е. применяемые для нагрева материалов.

К обогревающим излучателям принадлежит большинство электрических излучателей, газовые излучатели с открытым, закрытым и частично экранированным пламенем, а также газовые беспламенные излучатели с внутренним сгоранием.

К нагревающим излучателям, применяемым для нагрева материалов, выдержки их при определенной температуре, сушки, спекания (агломерации) шихты и т. п., относятся электрические излучатели с металлическим и неметаллическим телом накала, некоторые газовые излучатели с закрытым пламенем, газовые беспламенные излучатели с внутренним сгоранием, некоторые типы газоразрядных ламп и дуговых ламп.

Классификация инфракрасных излучателей, применяемых для лучистого обогрева, сушки и полимеризации, представлена на рис. 1.3.

Граничная длина волны таких излучателей составляет 15 мкм. Она определяется водяными парами, имеющимися в атмосфере, поскольку водяные пары почти полностью поглощают инфракрасное излучение с длиной волны более 15 мкм.

Источником энергии для нагрева тела инфракрасного излучателя может служить газообразное (природный газ, сжиженный газ), жидкое топливо (керосин, бензин), электрическая энергия или циркулирующий нагретый теплоноситель (вода, масло, воздух).

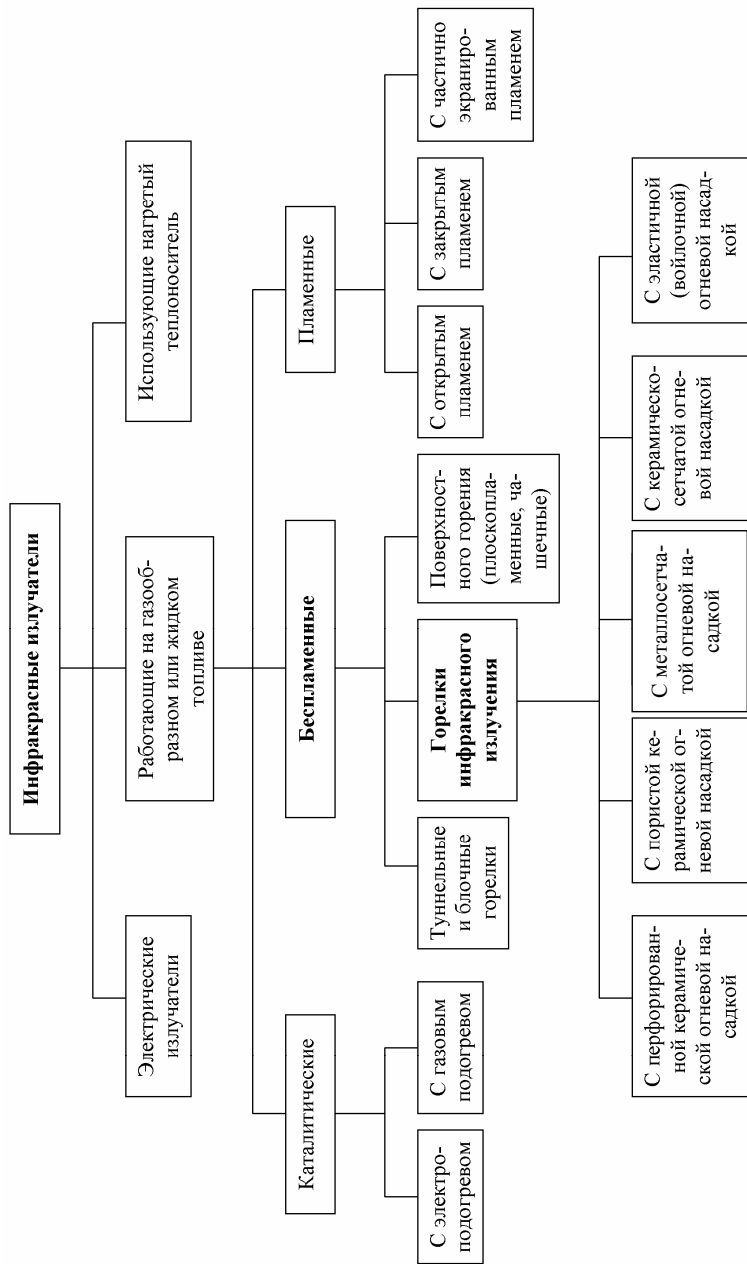


Рис. 1.3. Классификация инфракрасных излучателей

Электрические излучатели представляют собой устройства, выполненные в виде греющих панелей, тэнов, кварцевых или галогенных ламп. Температура излучающей поверхности электрических излучателей составляет 50–300°С, тепловая мощность 500–6000 Вт.

Инфракрасные излучатели, работающие на циркулирующем нагретом теплоносителе, конструктивно напоминают отопительные радиаторы. Наиболее распространены системы, работающие на горячей сетевой воде с температурой до 200°С при рабочем давлении в системе до 1,8 МПа. Реже в качестве теплоносителя используют масло или воздух. Обогреватели этого типа работают бесшумно, обеспечивают равномерное распределение температуры в объеме помещения и пожаробезопасны. В зависимости от температуры теплоносителя их можно устанавливать на высоте от 3 до 7 метров либо смонтированными в пол или потолок.

Инфракрасные излучатели, работающие на газообразном или жидком топливе, по методу сжигания подразделяются на три группы: каталитические, пламенные и беспламенные.

Каталитические излучатели представляют собой устройства, в которых в специальных каталитических насадках происходит низкотемпературное окисление горючих компонентов топлива. Температура излучающей поверхности составляет 230–430°С. Для начала работы необходим подогрев: электрический или газовый.

Пламенные излучатели обычно состоят из двух основных элементов: газовой горелки и излучателя. Последний нагревается непосредственно пламенем или продуктами сгорания. Пламенные инфракрасные излучатели чаще всего представляют собой устройства с открытым или частично экранированным пламенем. Температура газового пламени зависит от способа сгорания и используемого газового топлива и находится в пределах 1500–2000°С. Пламенные излучатели не находят пока широкого применения.

В беспламенных излучателях процесс горения происходит в специальных огневых насадках и/или вблизи огневой поверхности. В случае беспламенного сгорания температура пламени значительно ниже, чем при пламенном сгорании, и находится в пределах 600–1700°С. Длина волны излучения находится в пределах 1,5–5 мкм. В спектре излучения газового пламени наблюдается

полоса около 2,7 мкм, испускаемая молекулами воды, и полосы 2,7 и 4,2 мкм, испускаемые молекулами углекислого газа. Из этой группы наиболее широкое промышленное применение получили горелки инфракрасного излучения (ГИИ), которые далее рассмотрены более подробно.

### **1.3. Обзор литературных источников**

Интенсивные исследования и разработка горелок инфракрасного излучения (ГИИ) проводились в 40–60-е годы XX века. В результате было создано множество конструкций горелок различной мощности и назначения. Теоретические вопросы горения топлива на инфракрасных излучателях, лучистого теплообмена в помещениях, достижения в области конструирования и опыт использования инфракрасных горелок в СССР (России) и за рубежом изложены во многих литературных источниках. Большой вклад в разработку и исследование горелок с инфракрасными излучателями внесли А.И. Богомолов, О.Н. Брюханов, Д.Я. Вигдорчик, Б.С. Ициксон, А.М. Левин, М.А. Маевский, М.Б. Равич, А.К. Родин, Г.Н. Северинец и др.

В книгах Б.С. Ициксона и А.И. Богомолова с соавторами дано систематическое описание разнообразных конструкций ГИИ и подробно указаны сферы их использования. В монографиях Г.Н. Северинца рассмотрено использование ГИИ в процессах сушки и нагрева. Работы А.К. Родина посвящены применению ГИИ для отопления промышленных и сельскохозяйственных зданий. В монографии О.Н. Брюханова дано теоретическое обобщение процесса горения в ГИИ как разновидности микрофакельного сжигания газов. Наиболее подробная классификация методов беспламенного горения дана М.Б. Равичем. Им предложено выделить восемь методов беспламенного горения. Монография В.В. Харина посвящена устройствам автоматического управления работой ГИИ.

Общие технические требования к ГИИ регламентируются ГОСТ 25696-83\*. Согласно этому ГОСТу инфракрасные горелки в зависимости от температуры излучающей поверхности подразделяются на среднетемпературные (от 800 до 1000°C) и высокотемпературные (свыше 1000°C). Лучистый КПД при номинальной



мощности должен быть не менее 35% – для среднетемпературных и не менее 20% – для высокотемпературных горелок. Содержание оксида углерода (СО) в сухих неразбавленных продуктах сгорания ( $\alpha = 1,0$ ) не должно быть более 0,02% по объёму (250 мг/м<sup>3</sup>). Содержание оксидов азота (NO<sub>x</sub>) при тех же условиях и удельной тепловой мощности излучателя до 25 Вт/см<sup>2</sup> – 40 мг/м<sup>3</sup> (0,002%) для среднетемпературных и 50 мг/м<sup>3</sup> (0,0025%) для высокотемпературных.

Ученые из ВНИИпромгаз и ЛИСИ экспериментально определили температуру излучателей различных ГИИ и содержание СО и NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания. Ими установлено, что выход NO<sub>x</sub> не превышает 20–24 мг/м<sup>3</sup>, а выход СО только у некоторых горелок превышает 250 мг/м<sup>3</sup>. Ряд проведённых опытов с анализом температур излучающих панелей и значений NO<sub>x</sub> показал на первый взгляд парадоксальную зависимость: чем ниже температура излучающей поверхности, тем выше содержание NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания. Дополнительно проведённые опыты выявили, что при низких температурах излучающей поверхности панели толщина пограничного слоя (пламени) увеличивается и, соответственно, возрастает время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур.

О.Н. Брюханов с соавторами разработали металлотетчатую горелку 6206, которая обеспечивает долговечность и надёжность работы. Результаты исследования металлотетчатого инфракрасного излучателя кругового действия показали, что в сухих продуктах сгорания содержание СО составляет 155–165 мг/м<sup>3</sup>, а содержание NO<sub>x</sub> – 30–50 мг/м<sup>3</sup> на всех режимах работы излучателя.

Разработана передвижная газовая инфракрасная установка для сушки или нагрева в условиях Севера и Западной Сибири. Отличительная особенность этой горелки – металлотетчатый излучатель размещён в кварцевом цилиндрическом экране, который обеспечивает ветроустойчивость. Излучение от сеток происходит через кварцевый экран и попадает на нагреваемый объект.

Ж.В. Мирзоян и О.Г. Рогинский (ВНИИпромгаз) изложили результаты испытаний инфракрасных излучателей с пористыми насадками в статье. По их данным, наилучшие показатели по «беспламенному» сжиганию наблюдаются у образцов из пенокерамики.

Исследователи из Новополоцкого политехнического института разработали и внедрили на хлебозаводах металлоточную инфракрасную горелку с удлиненной огневой насадкой. Горелка позволила повысить эффективность сжигания газа, качество выпекаемых изделий и свести к минимуму количество выбрасываемых вредных веществ: содержание CO в продуктах сгорания составляет 140–200 мг/м<sup>3</sup>, а NO<sub>x</sub> – 20–40 мг/м<sup>3</sup>.

В.П. Колосова из ГУП «Мосгаз» исследовала возможность использования инфракрасных горелок в бытовых газовых приборах, в частности в плитах. Испытания разработанных устройств горелок дали положительные результаты.

Большой интерес представляют разработки ученых из ИХФ РАН В.М. Шмелева и А.Д. Марголина. Ими предложены насадки с радиационным экраном в виде набора протяженных геометрических элементов пластин и цилиндров, а также в виде полостей.

#### **1.4. Устройство инфракрасных горелок «светлого» типа**

Горелки инфракрасного излучения являются разновидностью инжекционных горелок, рассчитанных на работу с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,02–1,07$ , что обеспечивает полноту сгорания газа. Существующие горелки делятся на два основных типа: «светлые» и «темные». В «светлых» излучателях горение газа открытое и происходит на поверхности керамической насадки. Схема устройства «светлых» ГИИ представлена на рис. 1.4.

ГИИ работают следующим образом: струя газа истекает из сопла 5 и эжектирует в смеситель 6 необходимое количество воздуха. Газовоздушная смесь направляется в распределительную камеру 7. Из камеры 7 смесь через отверстия керамической насадки 4 выходит на поверхность, где сгорает в тонком слое: примерно 1–1,5 мм. Значительная часть тепла при горении передается керамическим плиткам, поверхность которых через 40–50 с после зажигания горелки нагревается до рабочей температуры 800–1200°С. Поверхность излучающей насадки становится мощным источником инфракрасного излучения. Излучающие насадки изготавливаются керамические и керамические с сеткой 3.

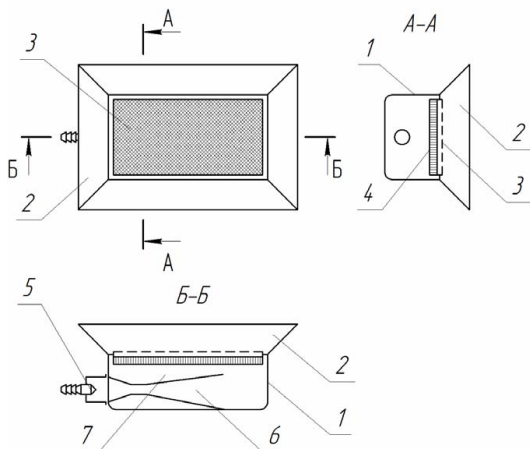


Рис. 1.4. Схема устройства горелки инфракрасного излучения:  
 1 – корпус; 2 – рефлектор; 3 – сетка; 4 – керамический элемент (насадка);  
 5 – сопло; 6 – смеситель; 7 – распределительная камера

Исследования зависимости температуры излучающей поверхности от диаметра каналов показали, что при больших диаметрах каналов температура излучающей поверхности выше. Но увеличение диаметров каналов может привести к проскоку пламени. Для повышения устойчивости горения устанавливают сетку, которая является вторичным излучателем. При прочих равных условиях наличие сетки снижает температуру отходящих продуктов горения, обеспечивает равномерный нагрев керамики, что увеличивает КПД излучателя.

Стенки рефлектора 2 не только отражают попадающие на них лучи, но и сами, нагреваясь, также излучают, но в длинноволновом спектре.

Продукты сгорания, в основном азот, углекислый газ и водяной пар, удаляются принудительной или общеобменной вентиляцией.

В промышленных и бытовых технических инфракрасных устройствах используются в основном газовые ГИИ с перфорированной и пористой керамической матрицей, а также с объёмными сетками и с эластичной (войлочной) насадкой (рис. 1.5). Объёмные сетки, керамические или металлические, в качестве насадки предложены для сжигания газа К.Н. Правозеровым и С.Н. Шориным в 1949 году.

На рис. 1.5 показаны некоторые виды излучающих насадок.

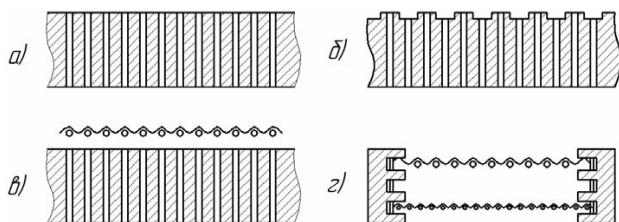


Рис. 1.5. Виды излучающих насадок:  
*a* – керамическая перфорированная; *б* – то же с рифлёной поверхностью;  
*в* – металлокерамическая; *з* – сетчатая

Насадки (*a* и *б*) состоят из перфорированных или пористых керамических плиток. Отверстия имеют диаметр около 1 мм. Металлокерамическая (*в*) насадка имеет дополнительно металлическую (нихромовую) сетку. Применение сетки повышает количество теплоты, передаваемой излучением, и повышает полноту сгорания. Металлическая насадка (*з*) представляет собой набор металлических сеток.

Керамические плитки изготавливаются из глины с введением добавок: каолина (бентонита), талька, асбеста, окиси хрома. Для уменьшения теплопроводности плитки путём создания пористости в массу добавляют древесные опилки или уголь, которые выгорают в процессе обжига плиток. Керамические плитки имеют плоскую или рифлёную излучающую поверхность. В последнем случае повышается ветроустойчивость. Наибольшее применение получили перфорированные керамические плитки, так как по сравнению с пористыми плитками они имеют меньшее гидравлическое сопротивление. Недостатком керамических насадок является хрупкость плиток. Металлические насадки лишены этого недостатка. Обычно используются две тканые сетки с квадратными ячейками из нихромовой проволоки Н80Х20. Пламя стабилизируется между сетками. Поэтому верхняя сетка берётся с размерами ячеек, обеспечивающими проросок, а нижняя – с размерами ячеек меньше критических, предотвращающих проросок пламени. Температура сетчатой насадки составляет 800–950°С.

ГИИ оснащаются различными устройствами автоматизации, которые обеспечивают розжиг горелок, контроль и регулирование горения. В последнее время большое распространение получили

логические микропроцессорные устройства, в которых при погасании газовой горелки делается попытка повторно зажечь погасшую горелку. Если горелка по каким-либо причинам не загорается, происходит отключение газа от всей группы горелок. Более сложные устройства контролируют работоспособность всех элементов автоматики и в случае аварийной ситуации сообщают причину. Такие системы способны автоматически управлять температурным режимом помещения в течение суток, прогнозировать и предотвращать аварийные ситуации.

Современные системы автоматики газовых горелок включают:

- 1) систему автоматического зажигания;
- 2) датчики горения и отсечное устройство;
- 3) микропроцессорный блок контроля и управления;
- 4) световую и звуковую аварийную сигнализацию.

Автоматическая оптимизация процесса горения приводит к более эффективному использованию газа, безопасности эксплуатации и низкому содержанию вредных веществ в отработанных газах. Большое значение имеет возможность программирования параметров обогрева.

### **1.5. Патентные исследования «светлых» инфракрасных излучателей**

Патентные исследования устройств и способов работы ГИИ представляют значительный теоретический и практический интерес. Результаты исследований наглядно показывают процесс совершенствования горелок и позволяют сделать прогноз их дальнейшего развития.

Одним из первых известных охранных документов по ГИИ является авторское свидетельство (а. с.) СССР № 87854 «Горелка беспламенного сжигания газа низкого давления» (1950), авторы – С.Н. Шорин и К.Н. Правоверов. Согласно описанию изобретения керамическая головка горелки снабжена расширяющимися каналами шелеобразной формы. Горелка с керамической насадкой чашеобразной формы предложена по а. с. № 99889 (авторы – И.А. Недужий и М.С. Брехман).

Много лет интенсивные исследования и разработка ГИИ проводились в институте «ГипроНИИГаз» (г. Саратов) под руководством А.М. Левина, Е.П. Щуркина, Б.П. Адинскова и др. На рис. 1.6 представлена горелка по а. с. № 149846 (авторы – А.М. Левин и др.), у которой керамическая перфорированная насадка выполнена в виде цилиндра или многогранной призмы.

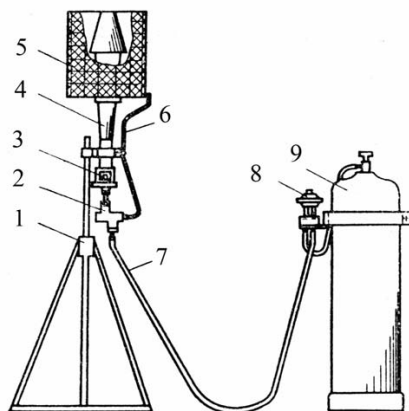


Рис. 1.6. Газовая горелка по а. с. № 149846:  
 1 – подставка; 2 – клапан; 3 – эжектор; 4 – смеситель; 5 – фонарь;  
 6 – датчик; 7 – шланг; 8 – редуктор; 9 – баллон

Газовоздушная смесь поступает в насадку из инжектора (эжектора) по оси симметрии. На основе этого изобретения серийно производилась горелка ГК-1-38 «Фонарь», предназначенная для ускорения сушки помещений после штукатурных работ в строящихся и ремонтируемых зданиях.

Для использования ГИИ на открытых площадках разработаны ветроустойчивые горелки. По а. с. № 177017 (рис. 1.7) горелка снабжена металлической сеткой 4 и камерой 5, образованной специальным кожухом 6, а в рефлекторе выполнены отверстия для забора воздуха над излучающей поверхностью. В дальнейшем для повышения ветроустойчивости предлагалось корпус горелки (а. с. № 314970) выполнять в виде дефлектора обтекаемой формы (например, в виде эллипсоида) и снабжать экраном, пропускающим инфракрасные лучи.

Кроме того, в устройстве этой горелки предусматривался подогрев газа и воздуха для повышения температуры насадки.

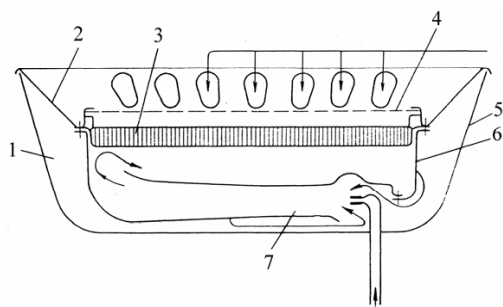


Рис. 1.7. Ветроустойчивая горелка по а. с. № 177017:

- 1 – стабилизирующая камера; 2 – рефлектор; 3 – керамический излучатель; 4 – стабилизирующая сетка; 5 – кожух; 6 – корпус; 7 – эжектор

Авторы изобретения (а. с. № 314972) также предложили размещать горелку в кожухе, причём в рефлекторе и кожухе выполнять отверстия для удаления продуктов горения. По а. с. № 315875 (автор А.А. Худенко) с целью увеличения радиационной теплоотдачи над излучателем установлен экран из прозрачного в области инфракрасного спектра материала, например, кварцевого стекла (рис. 1.8).

Ветроустойчивость и излучающая способность (КПД) повышаются и при выполнении поверхности насадки в виде пирамидальных и трапецеидальных выступов – а. с. № 186068 и № 237321, гребешков – а. с. № 279849 и патент RU № 2065123, углублений – а. с. № 1228587. Наибольшее практическое применение получили горелки с керамической насадкой с различной формой поверхности и металлической сеткой над ней.

Е.П. Щуркин с соавторами из «ГипроНИИгаза» (а. с. № 840578) предложили горелку с вогнутой по конусу излучающей насадкой и с центральным сквозным каналом 4 для отвода продуктов сгорания (рис. 1.9).

Для снижения вредных выбросов в атмосферу авторы патента RU № 2084762 создали ГИИ, у которой керамическая излучающая насадка выполнена с равномерно распределёнными отверстиями квадратного профиля.

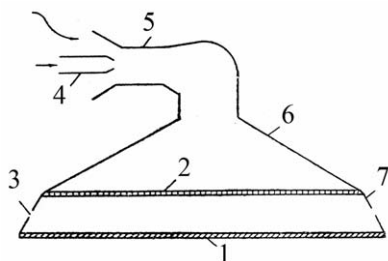


Рис. 1.8. Инфракрасный газовый нагреватель по а. с. № 315875:  
1 – экран; 2 – излучатель; 3 – отверстие; 4 – сопло; 5 – эжектор;  
6 – корпус; 7 – рефлектор

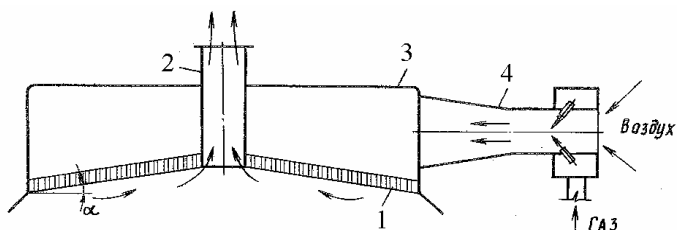


Рис. 1.9. Излучающая горелка по а. с. № 840578:  
1 – насадка; 2 – канал; 3 – корпус; 4 – смеситель

По патенту RU № 2127849 предложена радиационная горелка, у которой над излучающей насадкой установлен трансформатор тепла в виде пластины или экрана изготовленного из непрозрачного или частично прозрачного для инфракрасного излучения термостойкого материала.

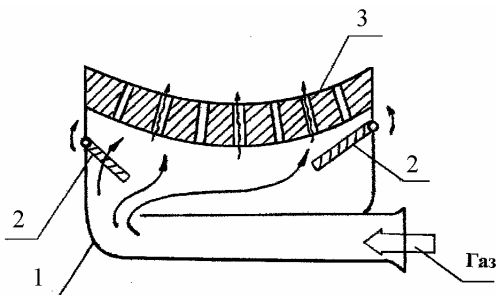


Рис. 1.10. Беспламенная горелка по патенту RU № 2137040:  
1 – камера; 2 – регуляторы; 3 – насадка



Газовая беспламенная горелка по патенту RU № 2137040 (рис. 1.10) отличается тем, что керамическая насадка выполнена сменной с формой профиля под нагреваемую поверхность, а в распределительной камере размещены газопроницаемые регуляторы 3 с возможностью их поворота и фиксации.

Горелки с металлоточечным излучателем для сушки помещений, ремонта асфальтобетонных покрытий, отопления производственных и животноводческих помещений и т. п. предложены в целом ряде изобретений: патенты US № 2775294 и № 3437415, патент DE № 1914615, а. с. № 800491 (Е.П. Щуркин и др.), а. с. № 877234 (О.Н. Брюханов и В.Г. Харюков), а. с. № 1070380 и патент RU № 2057989. Наибольший интерес представляет горелка по а. с. № 1070380 (автор Б.П. Адинсков), которая производилась как горелка ГИИС-20. Горелки по а. с. № 1820152 и патенту RU № 2057983, по сути, аналоги горелки «Фонарь» (а. с. № 149846).

Металловолокнистая пористая насадка предложена в а. с. № 844928, 1455136, в патенте RU № 2094703 и в патенте US № 5326631. Однако горелки с такими насадками пока не получили практического применения.

Большой интерес представляет сотовая конструкция перфорированной керамической излучающей насадки по патентам RU № 2151956, 2151957 и 2272219. Учёные из Института химической физики РАН В.М. Шмелёв и В.Д. Марголин предложили над излучающей насадкой размещать радиационный экран, выполненный в виде набора протяжённых геометрических элементов, например, пластин, цилиндров, изготовленных из кварца или керамики (патент RU № 2151956). Продукты сгорания из зоны горения проходят через элементы экрана, который предотвращает проникновение холодного воздуха в зону реакции, обеспечивает полную завершённость химических реакций. По патенту RU № 2151957 насадка выполнена в объёмной конфигурации в виде полостей с поперечным размером и глубиной не менее 10 мм, причём перфорированными являются только дно полостей или только стенки, или стенка и дно, что повышает экологические и эксплуатационные характеристики. У горелки по патенту RU № 2272219 (рис. 1.11) излучающая насадка выполнена в виде одной двухступенчатой полости или множес-

тва двухступенчатых полостей-сот или в виде системы двухступенчатых концентрических кольцевых полостей.

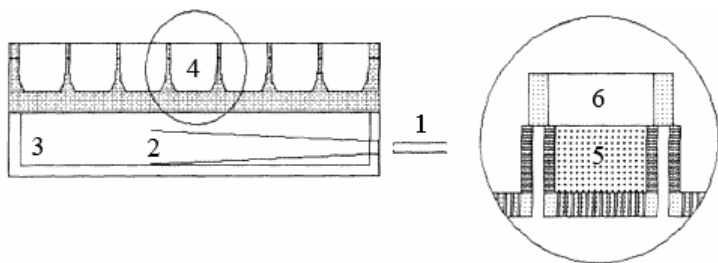


Рис. 1.11. Инфракрасная горелка по патенту RU № 2272219: 1 – сопло; 2 – смеситель; 3 – корпус; 4 – насадка; 5 и 6 – полости насадки

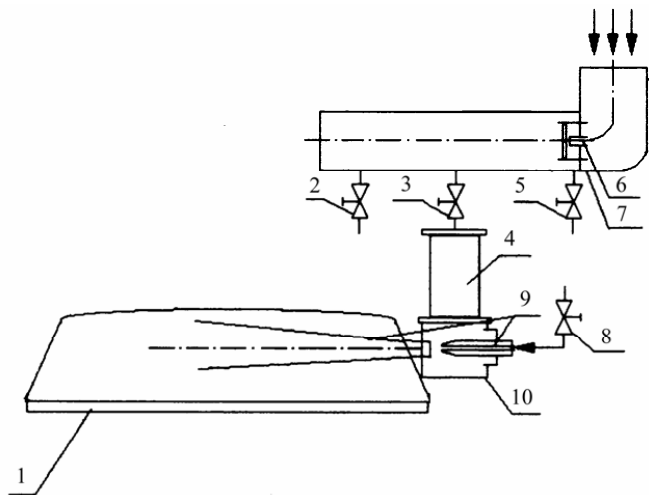


Рис. 1.12. Газовоздушная система инфракрасной горелки по патенту RU № 2234028: 1 – горелка; 2, 3, 5 – подвод воздуха к горелкам; 4 – воздушный фильтр; 6 – нагнетающий вентилятор; 7 – короб; 8 – подвод газа; 9 – эжектор и сопло горелки; 10 – камера смешения

Излучающая горелка по патенту RU № 2234028 (рис. 1.12) для работы в помещениях с запыленной или обедненной кислородом атмосферой оснащена централизованной системой принудительной подачи воздуха для горения, но автор не уточняет при этом величину коэффициента избытка воздуха.

Совершенствовалась и технология изготовления ГИИ. Так, по а. с. № 228884 (автор Р.Н. Кашин) с целью повышения технологичности изготовления горелки инжектор наполовину выштамповывается в дне корпуса, на котором приваривается накладка, имеющая форму второй половины инжектора. Эта технология нашла применение. Аналогично предложено изготавливать смеситель с двумя плоскими стенками по а. с. № 1104984.

Нагревание газа и воздуха перед подачей в смеситель предусмотрено в горелке по а. с. № 314970. По мнению авторов изобретения, нагрев газа и воздуха обеспечивает сгорание смеси в насадке с повышенной температурой. Для изолирования продуктов сгорания, используемых для нагрева газа и воздуха, над излучателем установлен экран из прозрачного в области инфракрасного спектра материала.

Трубчатый теплообменник размещён под насадкой и над смесительной камерой у горелок по а. с. № 805007. Этим обеспечивается работа горелки на жидком топливе в агрегатах для ремонта дорог с асфальтовым покрытием. Жидкотопливная ГИИ предложена и по патенту на полезную модель № 59776.

Анализ результатов патентных исследований с позиций теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) показывает, что развитие ГИИ как технической системы происходило эволюционным путём. Развивалась и совершенствовалась в первую очередь основная подсистема – излучатель.

Предлагался излучатель: перфорированный керамический, пористый, металлотетчатый, войлочный и керамический с сеткой. Последний вид излучателя нашел наибольшее применение. Форма излучателя: прямоугольная, круглая, цилиндрическая, чашеобразная, конусная, сферическая. Поверхность излучателя: плоская, с гребешками, с пирамидами, с углублениями, с радиационным экраном из геометрических элементов (пластин, цилиндров), в виде объёмной конфигурации с полостями-сотами.

Совершенствовался корпус горелки, упрощалась технология его изготовления, снижалась металлоёмкость. Расширялись функциональные возможности и области применения. Использовались новые материалы.

Из тризовских полей в ГИИ используются: механическое, тепловое (подогрев газа и воздуха) и частично химическое (каталитическое воздействие на процесс горения керамической насадки и металлической сетки).

Не найдено изобретений с акустическими, электрическими и магнитными полями. Можно предположить, что влияние этих полей на процесс горения в ГИИ ещё не исследовано или их воздействие несущественно.

Нет изобретений с целью осуществления процесса работы ГИИ на бедных газоздушных смесях. Хотя этот способ снижения эмиссии токсичных веществ широко используется в различных устройствах для сжигания топлива. Мало изобретений с целью расширения диапазона регулирования и с рециркуляцией продуктов сгорания. Слабо развивается динамизация конструкции горелки.

На основе вышеизложенного текста можно утверждать, что развитие ГИИ продолжится по следующим направлениям:

- 1) разработка горелок, работающих на бедных газоздушных смесях с организованным отводом продуктов сгорания;
- 2) переход на микроуровень — использование нанотехнологий для изготовления каталитического керамического излучателя.

## **1.6. Сравнительный анализ инфракрасных горелок «светлого» и «темного» типа**

Каждый тип инфракрасных горелок — «светлый» и «тёмный» имеет свои преимущества и недостатки. Только после анализа областей, в которых излучатель в наибольшей мере удовлетворяет своему функциональному назначению, можно выбрать оптимальный способ отопления и тип излучателя.

### ***Сравнение по области применения***

Для «светлых» излучателей область их использования точно ограничена — они непригодны для отопления объектов по всей площади, где постоянно находится человек. Высокая интенсивность и относительно острый угол излучения приводят при отоплении по всей площади к неравномерности плотности излучения на полу. Это приводит к тому, что в полу не аккумулируется достаточное

количество энергии для равномерного обогрева воздуха в помещении. Возникает большая разница между ощущаемой температурой и температурой воздуха, в результате чего человек не чувствует себя комфортно. Эффективно применять «светлые» излучатели для локального обогрева рабочих мест на открытых и полукрытых площадках, а также для нагрева инертных материалов.

«Тёмные» излучатели пригодны для отопления по всей площади промышленных помещений с постоянным пребыванием рабочего персонала, но помещение должно иметь достаточную тепловую изоляцию. «Тёмные» излучатели пожаробезопасны и оснащены системой удаления дымовых газов. Область их применения из-за более низкой теплоотдачи ограничивается помещениями с высотой от 4 до 6 м.

У «тёмных» излучателей процесс горения происходит в полностью закрытом пространстве, а у «светлых» – непосредственно на излучающей поверхности, т. е. открыто и небезопасно. Поэтому к применению «светлых» излучателей предъявляются более жесткие требования по пожарным нормам.

Область применения систем обогрева с газовыми ГИИ наиболее полно описана в стандарте СТО НП «АВОК» 4.1.5-2006. Согласно этому документу системы отопления и обогрева с «тёмными» ГИИ допускается применять на открытых площадках и в помещениях зданий и сооружений производственного и складского назначения классов функциональной пожарной опасности Ф5.1 и Ф5.2 по СНиП 21.01-97, относящихся к категории В1, В2, В3, В4 с размещением ГИИ вне взрывоопасных зон и категориям Г и Д по НПБ 105-03, сельскохозяйственных зданий класса Ф5.3, зрелищных и культурно-просветительских учреждений классов Ф2.3 и Ф2.4 с расчетным числом посадочных мест для посетителей и расположенных на открытом воздухе, физкультурно-оздоровительных комплексов и спортивно-тренировочных учреждений класса Ф3.6 без трибун для зрителей.

Системы со «светлыми» ГИИ допускается применять на открытых площадках и в помещениях зданий и сооружений производственного и складского назначения (при наличии в них персонала) классов функциональной пожарной опасности Ф5.1

и Ф5.2 по СНиП 21.01-97, относящихся к категории В2, В3, В4 с размещением ГИИ вне взрывоопасных зон и категориям Г и Д по НПБ 105-03, а также в помещениях и сооружениях классов функциональной пожарной опасности Ф2.3 и Ф2.4, расположенных на открытом воздухе.

### *Сравнение по конструктивным особенностям*

Современный газовый отопительный прибор «тёмного» типа представляет собой трубу диаметром 75–120 мм. С одной стороны трубы устанавливается горелка, с другой – вентилятор. Над трубой крепится рефлектор из полированной стали или алюминия. Вся конструкция подвешивается под потолком или на стене внутри здания. Труба нагревается продуктами сгорания до температуры 150–450°С. Используются стальные трубы, обработанные специальным термостойким покрытием с высокой степенью черноты (до 0,92–0,97), которое позволяет смещать спектр излучения в сторону инфракрасного. Продукты сгорания выбрасываются либо внутрь помещения, либо в атмосферу через специальный дымоход.

«Тёмные» излучатели имеют большие габаритные размеры (длина от 5 до 21 м) и вес (до 200 кг). «Светлые» излучатели (рис. 1.4) имеют небольшие размеры, компактны и легки благодаря высокой интенсивности излучения. Излучающая площадь 10 см<sup>2</sup> способна передать мощность около 1200 Вт. Сравнительно небольшая площадь излучающей поверхности приводит к высокой плотности теплового потока. ГОСТ 12.1.005-88\* ограничивает плотность теплового потока на незащищенных участках головы величиной 15 Вт/м<sup>2</sup>, а при понижении температуры на 4 градуса – 75 Вт/м<sup>2</sup>. Однако достичь такой плотности потока у «светлых» излучателей практически невозможно.

«Светлые» излучатели имеют срок службы до 20 лет, что в 2–3 раза больше по сравнению с «тёмными» излучателями. «Светлые» излучатели в среднем на 10–15% экономичнее по потреблению газа за счет исключения потерь тепла с уходящими газами, потребляют меньше электроэнергии и создают меньше шума, поскольку вообще не имеют вентиляторов. Кроме того, они надежнее в эксплуатации, так как не имеют подвижных частей. В то время как «тёмные» излучатели всегда имеют вентиляторы, которые у большинства

производителей еще и контактируют с дымовыми газами с температурой примерно 200°С.

«Тёмные» излучатели имеют значительно большую поверхность излучения, плотность теплового потока гораздо ниже, чем у «светлых» излучателей. «Тёмный» излучатель характеризуется более низкой лучистой эффективностью, которая колеблется в диапазоне 30–45%. Эта эффективность достигается с помощью рефлектора, который образует зеркальную плоскость, отражающую излучения в необходимом направлении. Кроме центрального излучения, которое распространяется примерно под углом 90°, имеется и боковое излучение с углом 120°. Трубы передают 30–45% теплоты инфракрасным излучением в рабочую зону помещения, обогревая людей, нагревая полы и оборудование. Остальная часть теплоты конвекцией передается окружающему воздуху. Доля отводимой в атмосферу с продуктами сгорания теплоты составляет не более 5–8% общего ее количества.

В «тёмных» излучателях основными проблемами являются прогорание излучающей трубы и поломки вытяжного вентилятора, связанные с перегревом подшипников и двигателя. К недостаткам по сравнению со «светлыми» излучателями также можно отнести наличие сложного электронного блока управления процессом горения.

#### ***Сравнение по санитарно-гигиеническим характеристикам***

«Светлые» излучатели ввиду отсутствия организованного отвода продуктов сгорания выделяют в отапливаемое помещение вредные выбросы. Исследования, проведенные НИИ медицины труда РАМН (Москва), показали, что в выбросах присутствуют  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , бензол, ацетон, формальдегид, метанол, бензапирен и др. Поэтому при расчете общеобменной вентиляции необходимо учитывать эти вредности и увеличивать нагрузку на вентиляцию.

Конструкция «тёмных» излучателей позволяет организованно удалять продукты сгорания из отапливаемого помещения, поэтому они соответствуют жестким санитарно-гигиеническим требованиям.

Процесс горения в «светлых» излучателях происходит при температуре порядка 900°С. В ядре факела «тёмного» излучателя температура составляет минимум 1500°С. Поскольку образование  $\text{NO}_x$

зависит от температуры горения, то очевидно, что «светлые» излучатели имеют значительное преимущество по содержанию  $\text{NO}_x$  в выбросах в атмосферу. По содержанию в выбросах  $\text{CO}$  «светлые» и «тёмные» излучатели имеют соизмеримые показатели.

Длительный опыт применения «светлых» излучателей в европейских странах нашел свое воплощение в Европейских нормах, в которых говорится, что на каждый кВт мощности «светлых» излучателей достаточно удалять всего  $10 \text{ м}^3$  воздуха из помещения. Причем это может осуществляться как принудительно, так и за счет естественного воздухообмена. Вентиляция обеспечивает возможность широкого использования «светлых» излучателей, которые эксплуатируются в Европе уже более 50 лет. За все это время никаких отрицательных воздействий на здоровье людей замечено не было.

По данным испытаний в Саратовской испытательной лаборатории, содержание вредных веществ в сухих неразбавленных продуктах сгорания для «светлых» излучателей фирмы «GoGaS» в среднем составляет:  $\text{CO}$  – 0,002% по объему,  $\text{NO}_x$  – 8 мг/м<sup>3</sup>. Причем содержание  $\text{NO}_x$  примерно на порядок ниже, чем у «тёмных» излучателей. Например, при испытании «тёмных» излучателей производства фирмы «GoGaS» были получены следующие результаты:  $\text{CO}$  – 0,004% по объему,  $\text{NO}_x$  – 75 мг/м<sup>3</sup>.

#### ***Сравнение по капитальным и эксплуатационным затратам***

Эксплуатационные затраты на энергоноситель, электроэнергию и техническое обслуживание для «светлых» инфракрасных излучателей до пяти раз меньше, чем для «тёмных». Это обусловлено простотой конструкции «светлых» излучателей, их большей экономичностью (до 10–15%) по потреблению газа за счет исключения потерь тепла с уходящими газами и более высоким лучистым КПД (до 15–20%) по сравнению с «тёмными».

Широкое применение «светлых» излучателей обусловлено их более низкой стоимостью по сравнению с «тёмными». В табл. 1.1 дано сравнение стоимости «светлых» и «тёмных» инфракрасных излучателей равной тепловой мощности производства фирмы ЗАО «Сибшванк».



Таблица 1.1

Стоимость «светлых» и «тёмных» излучателей равной мощности

№ п/п	Тип излучателя	Мощность, кВт	Расход газа, м <sup>3</sup> /ч	Расход электроэнергии, кВт/ч	Температура поверхности, °С	Цена, руб.	Срок эксплуатации
1	Светлый	20	2	0	900	21000	20 лет
2	Тёмный U-образный	20	2,55	0,1	400	30000	4–5 лет

Основные выявленные в процессе анализа недостатки излучателей светлого и темного типа отражены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Сравнение «светлых» и «темных» инфракрасных излучателей

Светлый	Тёмный
<i>Применение</i>	
<p>1. Нельзя применять в помещениях зданий и сооружений производственного и складского назначения, относящихся к категории В1 по НПБ 105-03 с размещением ГИИ вне взрывоопасных зон.</p> <p>2. Нельзя применять в помещениях с повышенной запыленностью и влажностью.</p> <p>3. Ограничено применение в помещениях с постоянным пребыванием людей.</p> <p>4. Должны размещаться таким образом, чтобы не создавать прямого воздействия инфракрасного излучения на глаза человека в секторе рабочего обзора.</p> <p>5. Усложняется проектирование систем отопления из-за трудностей связанных с соблюдением интенсивности теплового облучения</p>	<p>1. Применение в плохо утепленных помещениях зданий и сооружений производственного и складского назначения, для обогрева отдельных рабочих мест в помещениях, на открытых и полукрытых площадках, а также в качестве тепловой защиты ворот и дверей неэффективно.</p> <p>2. При высокой плотности оборудования и коммуникаций размещение больших «тёмных» излучателей и конструктивно необходимых в этом случае систем отвода дымовых газов от них представляет значительные трудности.</p> <p>3. Малоэффективны при установке на высоте более 6 м</p>
<i>Конструкция</i>	
<p>1. Наличие перфорированной керамической пластины требует определенных условий эксплуатации: большое внимание к чистоте воздуха в отапливаемом помещении,</p>	<p>1. Всегда имеют вентиляторы, которые у большинства производителей еще и контактируют с дымовыми газами с температурой примерно 200°С.</p>

Светлый	Тёмный
<p>необходимость систематического продувания пор пластины сжатым воздухом.</p> <p>2. Конструкция горелки не позволяет работать в помещениях, где поддерживается постоянное разрежение либо избыточное давление окружающего воздуха.</p> <p>3. Не снабжается системой организованного отвода продуктов сгорания.</p> <p>4. Малые пределы регулирования тепловой нагрузки</p>	<p>2. Более низкий лучистый КПД.</p> <p>3. Большие габариты.</p> <p>4. Дополнительное потребление электроэнергии электродвигателем вентилятора.</p> <p>5. Наличие дорогостоящего электронного блока управления горением.</p> <p>6. Более низкий срок службы из-за прогорания излучающей трубы.</p> <p>7. На 10–15% выше расход газа</p>
<i>Санитарно-гигиенические характеристики</i>	
<p>1. Продукты сгорания контактируют с окружающим воздухом.</p> <p>2. Увеличивается нагрузка на вентиляцию</p>	<p>1. Более высокая концентрация оксидов азота и оксида углерода в продуктах сгорания</p>
<i>Капитальные и эксплуатационные затраты</i>	
<p>1. Трудоёмкий монтаж</p>	<p>1. Из-за более сложной конструкции выше стоимость излучателя.</p> <p>2. Эксплуатационные затраты выше на 10–15% из-за потерь тепла с уходящими газами, более высокого потребления газа и затрат на электроэнергию</p>

## **1.7. Обзор производителей и рынка инфракрасных излучателей «светлого» типа**

### *Ведущие российские производители*

В конце 40-х годов М.Б. Равичем, одновременно с зарубежными коллегами, было доказано, что для отопления производственных помещений можно использовать системы лучистого (радиационного) отопления. В СССР подобные системы отопления были впервые применены в 1962 году в г. Саратове. С тех пор с их помощью производились обогрев открытых и полукрытых площадок различного назначения, сушка лакокрасочных покрытий в пищевой промышленности, отопление животноводческих ферм, обогрев теплиц, обогрев двигателей автомобилей в зимний период и т. д.

Современное промышленное производство систем инфракрасного газового излучения началось в России в 1996 году на совмест-

ном российско-германском предприятии ЗАО «Сибшванк» (г. Тюмень). Продукция ЗАО «Сибшванк» изготавливается по технологии и из комплектующих деталей компании Schwank GmbH (Германия).

В 2002 году запущено серийное производство инфракрасных газовых нагревателей на ЗАО «Купол-Старки» (г. Ижевск). ЗАО «Теплоэлектромаш» (г. Нижний Новгород) совместно с ООО «Коммерческий научно-производственный центр» разработало и внедрило в производство инфракрасный отопительный прибор ГИК-5. Предприятия ООО «НПО Композиционные материалы» (г. Екатеринбург) и Государственное предприятие «Институт физики прочности и материаловедения» СО РАН (г. Томск) декларируют использование инновационных разработок в области производства инфракрасных газовых обогревателей, разрабатывают и внедряют системы газового инфракрасного обогрева на заказ. Предприятие ОАО «КЗГА-Веста» (г. Казань) изготавливает газовые ГИИ мощностью 1,85 и 3,65 кВт. Существует еще ряд производителей «светлых» нагревателей. Среди них промышленная компания ЗАО «САВО» (г. Пенза), ЗАО «Русь-96» (г. Саратов), ОАО «Плескава» (г. Псков), Учреждение ОШ-25/6 (г. Йошкар-Ола). Модельный ряд серийно выпускаемых отечественных газовых ГИИ светлого типа на 16.02.2008 года представлен в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Газовые ГИИ «светлого» типа российских производителей

№ п/п	Производитель	Модель
1	ЗАО «Сибшванк» Совместное производство ОАО «Запсибгазпром» (г. Тюмень) и немецкая фирма «Шванк» ГмБХ. (г. Кёльн)	ГИИ-5, ГИИ-10, ГИИ-15, ГИИ-20, ГИИ-31
2	ООО «Мега Шванк» Совместное производство ООО «Теплогазинжиниринг» (г. Тюмень) и фирмы «Шванк» ГмБХ. (г. Кёльн)	ТехноШванк-10, -15, -20, -30, -40
3	ОАО «Ижевский электромеханический завод «Купол», г. Нижний Новгород	Газовый террасный нагреватель ГИТ-15 «ТИБЕТ»
4	ОАО «Казанский завод газовой аппаратуры – ВЕСТА», г. Казань	ГИИВ-3,65 «Унифицированная», ГИИ-1,85 «Звездочка»

№ п/п	Производитель	Модель
5	Учреждение ОШ-25/6, г. Йошкар-Ола	ГИМ 2, ГИМ2-01, АРГО
6	ОАО «Плескава», г. Псков	ТГИИБ 3,65-01
7	ООО «Коммерческий научно-производственный центр» и ЗАО «ТЕПЛО-ЭЛЕКТРОМАШ» г. Нижний Новгород	ГИК-5
8	НПП «Торий», г. Москва	ГИЖ-3,5 (2,4), «Инула 23»
9	ЗАО «Русь-96», г. Саратов	ГИВ-1,85, ГИВ-3,65
10	ЗАО «САВО», г. Пенза	ГИИ-2,9

### *Ведущие зарубежные компании-поставщики*

Системы газового инфракрасного обогрева стали широко применяться в Англии, Франции, ФРГ, Венгрии и США с конца 50-х годов. На российском рынке зарубежные инфракрасные обогреватели появились в 1993 году. Были налажены поставки в Россию систем лучистого обогрева из Германии, США, Англии и Италии. В 1996 году в России появилось первое совместное предприятие по производству газовых инфракрасных обогревателей – ЗАО «Сибшванк» (ОАО «Запсибгазпром», Россия, и Schwank GmbH, Германия). В 2002 году совместно с Schwank GmbH было основано еще одно предприятие – ООО «Мега Шванк».

На российском рынке «светлых» газовых излучателей на сегодняшний день работает восемь крупных иностранных производителей. Это немецкие компании Schwank GmbH, GoGaS Goch GmbH & Co. (Германия), Roberts Gordon (США), Adrian a.s. (Словакия), SBM International, SOLARONICS CHAUFFAGE (Франция), ITM (Италия). Все перечисленные зарубежные компании имеют официальные представительства в России, налаженную дистрибьюторскую сеть, продукция других импортируется конечным потребителям без посредников.

Модельный ряд представленных на российском рынке импортных газовых ГИИ светлого типа на 16.02.2008 года показан в табл. 1.4.

Таблица 1.4

## Газовые ГИИ «светлого» типа от зарубежных производителей

№ п/п	Производитель	Модель
1	Schwank GmbH	Серия supraSchwank и primoSchwank тепловой мощностью от 10 до 40 кВт ecoSchwank тепловой мощностью от 5 до 40 кВт Газовый фонарь: patioSchwank
2	GoGaS Goch GmbH & Co	Серия K84xx RN/RS тепловой мощностью от 6 до 45 кВт
3	Roberts Gordon	Серия PH-x тепловой мощностью от 9,5 до 46 кВт
4	Adrian a.s.	Серия CRx тепловой мощностью от 2,5 до 27 кВт
5	SBM International	Серия Vx-SX тепловой мощностью от 2,5 до 27 кВт Серии FS и FA тепловой мощностью от 0,45 до 14 кВт Бытовые обогреватели серии: x ZRS тепловой мощностью от 3 до 7,1 кВт Газовые керамические брудеры серий: XL и XLA тепловой мощностью от 7 до 14 кВт
6	SOLARONICS CHAUFFAGE	Серия SR II тепловой мощностью от 6,2 до 25,7 кВт
7	ITM	Газовый фонарь: ITM Scudo Grey, ITM Scudo Frisbee тепловой мощностью от 4,8 до 9 кВт

***Потребители газовых инфракрасных обогревателей***

Наиболее активно газовые ГИИ светлого типа в составе системы отопления покупают машиностроительные, транспортные, агропромышленные и автосервисные предприятия. Потенциальными потребителями инфракрасных обогревателей являются стадионы, ангары, гаражи, депо, склады, автосервисы и т. д. По прогнозам специалистов активными потребителями газовых инфракрасных отопительных систем могут стать предприятия пищевой промышленности, агропромышленные предприятия, а также логистические компании, владеющие крупными складскими сетями.

По оценкам экспертов, динамика ежегодного увеличения продаж газовых ГИИ по отношению к предыдущему году состав-

ляет в среднем 10%. Привлекательность рынка ГИИ объясняется следующим:

- 1) рынок мало насыщен;
- 2) рынок пока не сложившийся, но стабильный и прогнозируемый;
- 3) потенциальный рынок велик и растет в связи с увеличением промышленного производства;
- 4) рынок относительно сбалансирован. Приобретение и установка ГИИ осуществляется под заказ. Изготовители ГИИ достаточно гибко регулируют производство, подстраиваясь под спрос потребителей;
- 5) постоянный рост энерготарифов вынуждает предприятия использовать менее энергоемкое оборудование, особенно при техническом перевооружении отопительных систем.

#### **Недостатки рынка ГИИ:**

- 1) недостаточная известность на рынке систем лучистого отопления;
- 2) инертность рынка отопительных систем: отсутствие инициативы руководителей; отсутствие экономического обоснования для внедрения новой техники; бюрократическая волокита при разработке технического проекта, связанная с его согласованиями с городскими, газоснабжающими, пожарными, контролирующими организациями;
- 3) трудность получения лимитов на газ.

**Выводы.** Российские предприятия-производители не имеют достаточных ресурсов для того, чтобы реализовать проекты по производству и продвижению своей продукции на рынок в крупных масштабах. В основном продукция реализуется в сфере товаров народного потребления. Для целей отопления годовой объем газовых инфракрасных обогревателей, выпускаемый российскими предприятиями, по сравнению с объемами импорта и продукцией иностранных производителей с производственной базой в России мал (табл. 1.5) и в натуральном выражении составляет 23%.

Для повышения конкурентоспособности отечественных инфракрасных газовых обогревателей необходимы научные исследования и разработка инновационных проектов в области производства инфракрасных газовых обогревателей.

Таблица 1.5

Годовой объем выпуска ГИИ ведущими  
российскими производителями

№ п/п	Предприятие-производитель	Годовой объем производства, шт.
1	ЗАО «Сибшванк»	Около 3500
2	ОАО «Ижевский электромеханический завод «Купол»	Около 2000

### 1.8. Опыт использования инфракрасных нагревателей «светлого» типа

Федеральный закон «Об энергосбережении» № 28-ФЗ ставит задачу по снижению энергопотребления. В сфере отопления эту задачу успешно решает система газового лучистого обогрева. В настоящее время накоплен значительный опыт проектирования, монтажа и эксплуатации автономных систем лучистого отопления с газовыми ГИИ. Система отопления на базе инфракрасных излучателей позволяет добиться экономии затрат на отопление до 80% по сравнению с традиционными системами.

Инфракрасные излучатели применяются также для сушки зданий и помещений при отделочных работах, сушки лакокрасочных покрытий, местной подсушки при производстве ремонтных работ, прогрева мерзлого грунта при земляных работах, разогрева асфальтобетона при дорожных работах и т. п.

На российский рынок отопительного оборудования активно проникают зарубежные фирмы Roberts Gordon, Kubler, GoGas и другие с предложением установки, наладки и последующего обслуживания «тёмных» и «светлых» инфракрасных излучателей. Все фирмы отмечают положительный эффект применения ГИИ и, как следствие этого, растущий спрос на подобное оборудование.

Опыт эксплуатации излучателей фирмы GoGas на предприятиях России показал превосходные результаты: срок окупаемости составил в среднем два года. «Светлые» инфракрасные излучатели применяются фирмой GoGas для полного или частичного отопления высоких помещений уже более 50 лет. Они зарекомендовали

себя с самой лучшей стороны низким потреблением топлива и высокой комфортностью. Оборудование фирмы GoGas установлено и успешно эксплуатируется на ряде крупных промышленных предприятий России, таких как ОАО «Уралмашзавод» (г. Екатеринбург), Бутовский комбинат стройматериалов (г. Москва), Мытищинский завод Мосводоканалстрой, завод «Красный котельщик» (г. Таганрог), ОАО «Дзержинскхиммаш» (Нижегородская область).

Крупнейший поставщик систем лучистого обогрева – немецкая компания Kubler GmbH – внедряет свою продукцию в нашей стране с 1993 года. На территории России и стран СНГ более чем на 60 производственных, сельскохозяйственных и социально значимых объектах смонтировано около 2000 установок различной мощности производства компании Kubler GmbH. Российские фирмы «Ринко» и «СтройПроектСервис» сотрудничают с фирмой Kubler, успешно применяя её оборудование для проектирования систем отопления на базе инфракрасных излучателей. В России этими фирмами смонтированы системы лучистого отопления в Москве, Санкт-Петербурге, Волгограде, Нижнем Новгороде, Пензе и других городах.

Газовые инфракрасные нагреватели производства компании ADRIAN a.s. (Словакия) успешно эксплуатируются в составе систем лучистого отопления таких российских предприятий как ОАО «Тантал» (г. Саратов), ОАО «Уралгидромаш» (г. Сысерть), ОАО «Ижорские заводы» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Ижевский электромеханический завод «Купол» и др.

В 1996 году в России появилось первое предприятие по производству газовых инфракрасных обогревателей – ЗАО «Сибшванк». Это событие кардинально изменило обстановку в сфере поставок промышленных газовых инфракрасных обогревателей, так как появление нового сильного игрока заставило импортеров серьезно скорректировать свои стратегии работы на рынке в сторону снижения цен, усиления региональной экспансии и улучшения качества сервиса.

В 2003 году на Костанайском дизельном заводе смонтирована система отопления, состоящая из «светлых» и «тёмных» излучателей производства ЗАО «Сибшванк» ГИИ-22, -20, -10 общим количеством 657 штук. Применение лучистых излучателей в цехах



главного корпуса завода позволило значительно ускорить обогрев цехов. Затраты на отопление сократились более чем в 3,5 раза. ОАО «Ивановский завод тяжелого станкостроения» отмечает снижение затрат на отопление примерно в 10–12 раз по сравнению с централизованным теплоснабжением от городских источников тепла. На ЗАО «Завод сварочных материалов» (г. Березовский) введена в эксплуатацию система отопления инфракрасными излучателями производственных помещений общей площадью 3000 м<sup>2</sup> (объем 16500 м<sup>3</sup>). Предприятие отмечает, что система весьма экономна, доступна и проста в обслуживании, работает в автоматическом режиме надежно и стабильно.

В ЗАО «Рекон» (г. Чебоксары) для обогрева производственных площадей используются «светлые» газовые ГИИ. Система обогрева оснащена регулирующим устройством с недельным циклом программирования температуры в отапливаемом помещении, с возможностью программирования «ночной», «дневной» температуры и режима «незамерзания». За период эксплуатации система обогрева с газовыми излучателями производства ЗАО «Сибшванк» зарекомендовала себя надежным, экологически чистым способом отопления производственных помещений. Техническое обслуживание излучателей проводится в летний период и сводится в основном к чистке керамических пластин сжатым воздухом. Расчетные годовые затраты ЗАО «Рекон» на отопление производственных площадей снизились в три раза по сравнению с традиционной схемой воздушно-водяного отопления.

На сегодняшний день на российском рынке отопительного оборудования преобладают предложения зарубежных фирм-производителей, однако в России накоплен значительный опыт использования «светлых» инфракрасных излучателей отечественного производства для отопления помещений промышленного, коммунально-бытового и сельскохозяйственного назначения. В результате исследований, проведенных рядом институтов (ВНИИГАЗ, «Гипрониигаз», «Мосгазпроект», СКБ «Газприборавтоматика» и др.), были изучены технические возможности применения ГИИ для отопления и получены их теплотехнические и санитарно-гигиенические характеристики. Серийно выпускался ряд ГИИ: ГИИ-19А,

ГК-1-38 и др. – института «Гипрониигаз», ГИИВ-1, ГИИВ-2, ГИ-ИБЛ, «Звёздочка» – СКБ «Газприборавтоматика» и др. В 1996 году НП «АВОК», используя результаты исследований АО «ЦНИИ-промзданий», «НПО ТЕРМЕК», НИИ медицины труда РАМН, АО «Запсибгазром», разработал «Рекомендации по применению систем обогрева с газовыми инфракрасными излучателями», которые создали нормативно-правовую основу применения газового инфракрасного отопления и обогрева. Кроме материалов указанных рекомендаций стандарт включает методику расчёта обогрева инфракрасными излучателями с возможностью определения мощности системы и количества инфракрасных излучателей.

Таким образом, в России созданы все условия для широкого внедрения энергосберегающих автономных систем газового отопления на базе отечественных инфракрасных излучателей.

### **Выводы по разделу 1**

1. Инфракрасные газовые горелки «светлого» типа с керамическим перфорированным излучателем просты по конструкции, эффективны и получили широкое распространение.

2. В «светлых» ГИИ продукты сгорания попадают непосредственно в помещение, что ограничивает область их применения.

3. Не найдено патентов на изобретения с целью осуществления процесса работы ГИИ на бедных газовоздушных смесях. Хотя этот способ снижения эмиссии токсичных веществ широко используется в различных газогорелочных устройствах.

4. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков инфракрасных горелок «светлого» и «тёмного» типа показал, что сферы применения ГИИ «светлого» типа, значительно шире по сравнению с «тёмными».

5. Существенно минимизировать воздухообмен в помещении, где используются ГИИ, можно за счет применения организованного отвода продуктов сгорания.

6. Для повышения конкурентоспособности отечественных инфракрасных газовых обогревателей необходимы исследования и разработка инновационных проектов в области производства инфракрасных газовых обогревателей.

## Контрольные вопросы к разделу 1

1. Когда было открыто инфракрасное излучение?
2. В каком месте располагается инфракрасное излучение в спектре электромагнитных колебаний (волн)?
3. По каким характеристикам производится классификация инфракрасных излучателей?
4. Что такое «тёмный» излучатель?
5. Что такое «светлый» излучатель?
6. Кто из российских ученых внес существенный вклад в исследование и разработку ГИИ?
7. Перечислите элементы устройства ГИИ.
8. Назовите виды излучающих насадок.
9. Что дает автоматизация работы ГИИ?
10. Каков достигнутый уровень развития устройств ГИИ?
11. Какие тенденции наблюдаются в развитии устройств ГИИ?
12. Какие физические эффекты и тризовские поля используются для совершенствования устройства и способов работы ГИИ?
13. Какие достоинства имеют инфракрасные горелки «тёмного» типа?
14. Какие преимущества имеют инфракрасные горелки «светлого» типа?
15. Перечислите ведущих российских производителей ГИИ.
16. Перечислите ведущих иностранных производителей ГИИ.
17. В каких сферах хозяйственной деятельности используются ГИИ?
18. Что показал опыт использования ГИИ?

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

---

### 2.1. Постановка задачи

В условиях эксплуатации ГИИ на открытом воздухе требуется высокая их ветроустойчивость. Это может быть достигнуто установкой перед насадкой экрана, прозрачного для инфракрасного излучения. Экран защищает насадку от ветрового охлаждения, препятствует задуванию пламени и снижению мощности излучения. Однако экран, выполненный из кварцевого стекла, вследствие отражения части инфракрасного излучения будет способствовать разогреву керамических плиток, и температура газовой смеси может повыситься настолько, что станет возможным проскок пламени. Стабильность горения по отношению к проскоку можно повысить увеличением коэффициента  $\alpha$  смеси. Избыточный воздух снизит интенсивный нагрев газовой смеси в каналах. Следует отметить, что при увеличении коэффициента  $\alpha$  уменьшается температура горения, падает температура керамических плиток и, следовательно, согласно закону Стефана – Больцмана, снижается интенсивность инфракрасного излучения.

В литературе встречаются описания конструкций ГИИ с экраном, прозрачным для инфракрасного излучения (см. подраздел 1.5), но отсутствуют сведения об особенностях их работы. Нет сведений о работе горелок инфракрасного излучения на бедных газовой смеси с установленным экраном из жаропрочного стекла.

Экспериментальные исследования работы ГИИ при установке экрана, изолирующего продукты сгорания от окружающего воздуха, представляют значительный научный интерес, так как именно открытое поверхностное горение ограничивает сферу их применения (см. подразделы 1.6–1.8).

Механизм горения газообразного топлива на поверхности перфорированной керамической насадки зависит от следующих факторов:

- 1) кинетики химических реакций в зоне горения и в предпламенной зоне;

- 2) аэродинамики в зоне горения и распространения продуктов сгорания;
- 3) теплообмена между зоной горения и поверхностью насадки, а также между свежей газовойдушной смесью, продуктами сгорания и окружающей средой.

Таким образом, для исследования работы ГИИ на бедных газоздушных смесях при установке прозрачного экрана над излучателем необходимо выяснить следующие теоретические моменты:

- 1) зависимость температуры горения газового топлива при микрофакельном сжигании на поверхности керамических матриц от коэффициента избытка воздуха;
- 2) изменение теплообмена пламени с керамической плиткой при увеличении коэффициента избытка воздуха;
- 3) влияние избыточного давления под экраном на процесс горения, теплообмена и образование продуктов сгорания;
- 4) влияние поверхности прозрачного экрана на тепловой баланс горелки;
- 5) влияние прозрачного экрана на процесс теплообмена продуктов сгорания с окружающим воздухом.

## **2.2. Температура в зоне горения газа и на поверхности керамических матриц**

Известно, что повышение доли лучистого теплообмена и уменьшение потерь теплоты с уходящими газами при беспламенном сжигании газа достигается за счет снижения температуры в зоне горения до 700–900°С путем интенсивного отвода выделяющейся теплоты в поверхность керамических плиток и стенки огневых каналов. Снижать температуру в зоне горения можно только до нижнего предела – температуры воспламенения газовойдушной смеси. Для смеси метана с воздухом температура воспламенения равна 650°С, а для природного газа в смеси с воздухом – 530°С.

Установлено, что при увеличенном расходе смеси температура поверхности плиток повышается и меняется расположение зон горения. Отдельные участки плитки раскаляются до белого цвета, их температура достигает 1050–1100°С. Смесь подогревается в выход-

ной части каналов до температуры самовоспламенения, и зона горения перемещается в каналы. Внутренняя поверхность выходной части каналов раскаляется, увеличивается поток тепла, передаваемого теплопроводностью в глубь плитки, а температура наружной поверхности ее уменьшается до 950–1000°С. Так как температура поверхности плитки достигает температуры внутренних стенок канала, то отверстия в ней трудно различить – вся плитка как бы покрывается огненной пеной (плазмой). При дальнейшем разогреве поток тепла, передаваемого теплопроводностью в глубь плитки, увеличивается настолько, что зона горения все дальше продвигается в глубь каналов, перегородки между ними темнеют и видны раскаленные светящиеся отверстия. В этом случае происходит проскок пламени внутрь горелки.

Таким образом, наилучшее положение зоны химических реакций и зоны высокотемпературных продуктов сгорания, при котором будет обеспечиваться максимальная теплоотдача от пламени, – в выходной части каналов. В литературе отмечается, что при работе ГИИ горение также осуществляется в зоне, прилегающей к керамике, и температура пламени соответствует температуре горения газа, то есть 1600–2000°С. Следует отметить, что горение только на поверхности приведет к увеличению потерь тепла с уходящими газами и, следовательно, к снижению отдачи тепла излучением. Это связано с уменьшением температуры, а значит, доли излучения поверхности устьев огневых каналов.

На рис. 2.1 изображено наилучшее положение фронта горения, при котором теплоотдача излучением максимальна. Площадь поверхности теплообмена плиток с пламенем также максимальна, так как пламя покрывает всю внешнюю поверхность и поверхность верхней части каналов.

Абсолютное количество теплоты  $Q_{изл}$ , излучаемое керамической поверхностью горелки беспламенного типа, зависит от площади поверхности излучения и в соответствии с законом Стефана – Больцмана определяется по формуле

$$Q_{изл} = F_0 4,9\epsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.1)$$

где  $F_0$  – площадь поверхности излучения;  $T$  – абсолютная температура этой поверхности;  $\varepsilon$  – степень черноты излучения экрана.

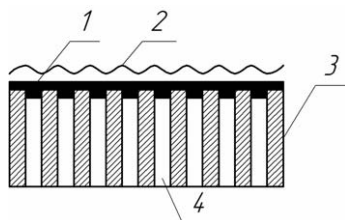


Рис. 2.1. Положение пламени в перфорированной насадке: 1 – фронт горения; 2 – металлическая сетка; 3 – керамическая плитка; 4 – отверстия

График на рис. 2.2 показывает распределение температуры по толщине перфорированной керамической плитки.

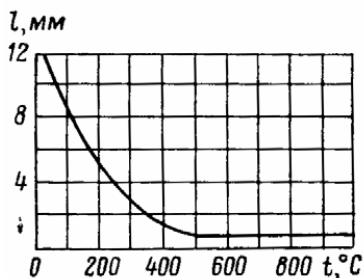


Рис. 2.2. Распределение температуры по толщине плитки

Из рис. 2.2 видно, что для обеспечения максимального лучистого потока теплонапряженным должен быть верхний слой керамики плиток толщиной 0,5–1 мм.

Таким образом, нижний предел температуры огневой поверхности представляет собой температуру, при которой происходит воспламенение горючей смеси на огневой поверхности, а также в устье огневых каналов, и наблюдается устойчивый режим горения. Верхний предел температуры огневой поверхности определяется изменением теплового баланса на огневой поверхности перфорированной насадки при захождении пламени в глубь насадки с развитием проскока пламени.

Разбавление продуктов сгорания избыточным воздухом приводит к снижению теоретической температуры горения топлива (рис. 2.3).

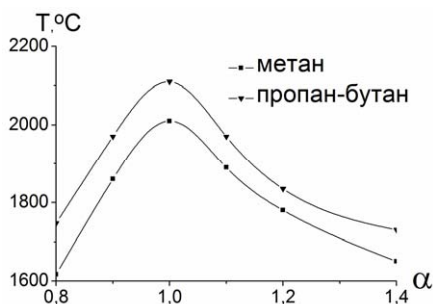


Рис. 2.3. Зависимость теоретической температуры горения газового топлива от коэффициента избытка воздуха

Учитывая нижний предел воспламенения смеси метана с воздухом, коэффициент избытка воздуха не должен быть больше величины  $\alpha = 2$ .

Между температурой продуктов сгорания, уходящих из зоны горения, и долей прямой отдачи тепла излучением  $\eta_{\text{рад.теор}}$  существует простая зависимость, которая для случая сжигания газа при теоретически необходимом количестве воздуха, подаваемого в зону горения, имеет вид:

$$\eta_{\text{рад.теор}} = 1 - \frac{c' t'}{c'' t''} = 1 - \frac{t'}{t''} c, \quad (2.2)$$

где  $t'$  — реальная температура дымовых газов при выходе из зоны горения;  $t''$  — теоретическая температура горения;  $c'$  и  $c''$  — соответственно теплоемкости продуктов сгорания при температурах  $t'$  и  $t''$ ;  $c' \approx c'' = c$ .

Из формулы (2.2) видно, что чем ниже температура продуктов сгорания, уходящих из зоны горения, тем большая доля выделившегося тепла может быть передана излучением.

Из вышесказанного следует, что наиболее эффективный путь повышения излучательной способности керамической матрицы — это снижение потерь тепла с уходящими газами путем увеличения отвода тепла от пламени к поверхности плиток. При этом следует учитывать верхний предел температуры огневой поверхности



насадки и развитие проскока пламени при захождении пламени в глубь каналов. Стабильность горения по отношению к проскоку можно повысить, увеличив коэффициент  $\alpha$ . Это приведет к понижению теоретической температуры горения вследствие разбавления смеси воздухом, а значит, и температуры в зоне горения. График на рис. 2.4 показывает снижение температуры плиток при увеличении коэффициента  $\alpha$ .

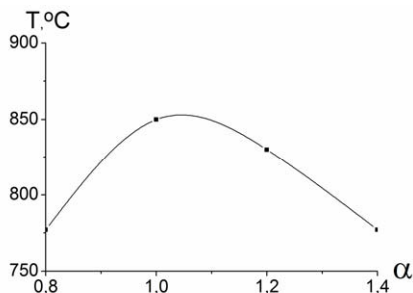


Рис. 2.4. Зависимость температуры поверхности керамических плиток от коэффициента избытка воздуха

При этом доля прямой отдачи тепла излучением  $\eta_{\text{рад.теор}}$ , судя по формуле (2.2), не изменится, если не изменится отношение  $\frac{t'}{t''}$ . Учитывая, что теплопроводность продуктов сгорания изменяется незначительно в интервале температур 1700–2000° С, можно утверждать следующее:

$$\frac{t'}{t''} = \frac{800}{2000} = \frac{680}{1700} = 0,4. \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) показывает, что доля прямой отдачи теплоты излучением  $\eta_{\text{рад.теор}}$  практически не изменяется при понижении теоретической температуры горения из-за увеличения коэффициента избытка воздуха, изменяется лишь согласно закону Стефана – Больцмана количество тепла  $Q_{\text{изл}}$ , излучаемое керамической поверхностью горелки, то есть:

$$F_0 4,9\epsilon \left( \frac{800 + 273,15}{100} \right)^4 > F_0 4,9\epsilon \left( \frac{680 + 273,15}{100} \right)^4. \quad (2.4)$$

Зависимость температуры керамических плиток и температуры в зоне горения при микрофакельном сжигании газового топлива от коэффициента избытка воздуха значительно менее выражена в сравнении с изменением теоретической температуры горения.

Учитывая вышесказанное, для обеспечения устойчивой работы ГИИ на бедных газоздушных смесях при условии повышения доли теплоты, отводимой от пламени, необходимо определить влияние разбавления газоздушной смеси избыточным воздухом на пределы устойчивой работы излучателя.

### **2.3. Пределы устойчивой работы горелок инфракрасного излучения**

Различают следующие режимы поведения пламени у огневых отверстий: устойчивое горение, проскок и отрыв пламени. Устойчивое горение (стабильное пламя) — это установившееся состояние, при котором по отношению к выходному отверстию пламя занимает примерно постоянное положение. Проскок возможен только у пламени предварительно подготовленной газоздушной смеси, а отрыв — любого пламени.

Стабильность пламени зависит от скорости газового потока, геометрии огневого канала, состава смеси, влияния стенки канала и скорости распространения пламени. Решающим фактором является соотношение скорости газового потока и скорости распространения пламени в устье огневого канала. Если скорость распространения пламени превышает скорость потока горючей смеси, то фронт горения перемещается навстречу вытекающей смеси и проникает в огневые отверстия. Произойдет проскок пламени, который сопровождается хлопком — взрывом горючей смеси в смесителе. Если скорость горючей смеси превышает скорость распространения пламени, то фронт пламени отрывается от огневого отверстия. Отрыв пламени сопровождается погасанием. Устойчивость по отношению к проскоку является для горелок инфракрасного излучения главным критерием нормальной работы, так как отрыв пламени возникает лишь в диапазонах значений  $q$  и  $\alpha$ , не представляющих интереса для практики.

В керамической насадке смесь проходит через цилиндрические каналы диаметром меньше критического. Горение в начальный период происходит в зоне малой толщины над поверхностью, а затем пламя заходит в устье каналов. Благодаря этому огневая поверхность разогревается до температуры 750–950°C. Насадка прогревается вглубь и осуществляет при этом предварительный подогрев горючей смеси. Предварительный подогрев смеси ведет к увеличению скорости распространения пламени, а это может вызвать его проникновение в глубь каналов насадки и в дальнейшем – проскок пламени.

Экспериментальные исследования пределов устойчивости пламени на перфорированных керамических насадках показали, что проскок пламени через них возможен в тех случаях, когда тепловую мощность увеличивают до некоторого критического значения. При этом тепловая мощность зависит от вида газа и содержания воздуха в горючей смеси.

На рис. 2.5 приведены пределы проскока пламени смеси сжиженного газа с воздухом для керамической плитки с отверстиями 1,55 мм.

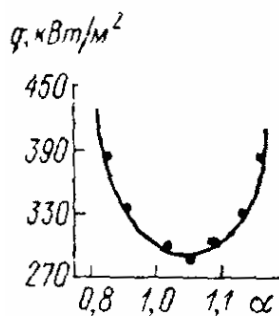


Рис. 2.5. Пределы проскока пламени

Кривая, ограничивающая область проскоков снизу, получена при мощностях значительно превышающих номинальную. Так как теплота сгорания смеси стехиометрического состава больше теплоты сгорания при бедной или богатой смеси, то минимум критической тепловой мощности приходится на величину коэффициента  $\alpha = 1,05$ .

Из рис. 2.5 видно, что при  $\alpha \geq 1,15$  возникновение проскока пламени через перфорированные керамические насадки уже не зависит от тепловой нагрузки горелки. Значит, для повышения устойчивости к проскоку горелок инфракрасного излучения при условии повышения температуры поверхности керамических плиток следует использовать газозвоздушную смесь с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha \geq 1,15$ .

## 2.4. Гидравлический режим газовых инфракрасных горелок

Теоретически необходимое количество кислорода для полного сгорания углеводородных газов определяется по стехиометрическому уравнению

$$C_n H_m + \left( n + \frac{m}{4} \right) O_2 = n CO_2 + \frac{m}{2} H_2 O. \quad (2.5)$$

В воздухе объемное содержание кислорода составляет 21%, поэтому объем воздуха, необходимого для сгорания 1 м<sup>3</sup> газа, в 4,76 раза больше объема кислорода ( $100/21 = 4,76$ ). Расход воздуха, необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup> газа, определяется по формуле

$$V_0 = 0,0476 \left[ 0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left( n + \frac{m}{4} \right) C_n H_m - O_2 \right]. \quad (2.6)$$

Отношение действительного объема воздуха  $V_p$  к теоретически необходимому объему  $V_0$  представляет собой коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_p}{V_0}. \quad (2.7)$$

Чтобы достигнуть полного сгорания газа, необходимо подводить воздух с коэффициентом избытка не менее  $\alpha = 1,02$ .

ГИИ работают на газе низкого давления, поэтому любая потеря напора затрудняет получение газозвоздушной смеси необходимого состава. Суммарные потери напора в горелке складываются из потерь энергии во всасывающей камере  $\Delta P_{в.к}$ , в эжекторе  $\Delta P_{эж}$ , в излучающей панели  $\Delta P_{изл.п}$  и в металлической сетке  $\Delta P_{сет}$ :

$$\sum \Delta P_z = \Delta P_{в.к} + \Delta P_{эж} + \Delta P_{изл.л} + \Delta P_{сет}. \quad (2.8)$$

Из четырех составляющих потерь напора бóльшая часть падает на преодоление гидравлического сопротивления сетки, расположенной в зоне высоких температур. Так как объем продуктов сгорания более чем в 4 раза превышает объем холодной газозвдушной смеси, то гидравлическое сопротивление сетки может возрасти примерно в 16 раз. Гидравлическое сопротивление сетки определяется по формуле

$$\Delta P_{сет} = \frac{\xi}{2} v_{см}^2 \rho, \quad (2.9)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления сетки;  $v$  – скорость выхода газозвдушной смеси, м/сек;  $\rho$  – плотность газозвдушной смеси, кг/м<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$\rho = \frac{\rho_g + m\rho_v}{1 + m}, \quad (2.10)$$

где  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_v$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – действительное отношение расхода воздуха к расходу газа, равное  $\alpha \cdot V_0$ .

Во всех случаях скорость выхода смеси находим по формуле

$$v_{см} = \frac{Q_{см}}{F_{см} 3600}, \quad (2.11)$$

где  $Q_{см}$  – расход газозвдушной смеси, м<sup>3</sup>/ч;  $F_{см}$  – площадь живого сечения сетки, м<sup>2</sup>.

Значения коэффициентов гидравлического сопротивления могут определяться по формуле

$$\xi_1 = \frac{2\Delta P}{\rho v_{см}^2} = K_0 (1 - f) \left( \frac{1}{f} - 1 \right)^2 \quad (2.12)$$

при  $Re = \frac{v_{см} \delta_{cp}}{v} \geq 400$ , а при  $Re < 400$  – по формуле

$$\xi = K_{Re} \xi_1, \quad (2.13)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса;  $\delta_{cp}$  – средний диаметр проволоки сетки, м;  $K_{Re}$  – коэффициент, учитывающий влияние характера движения на потери давления; определяется по графику, приведенному на рис. 2.6;  $K_0 = 1,3$  для сеток, бывших в эксплуатации, а для новых –  $K_0 = 1$ ;  $\xi_1$  – коэффициент гидравлического сопротивления

сетки;  $f$  – коэффициент живого сечения сетки. Последний находим по формуле

$$f = \frac{F_0}{F_c}, \quad (2.14)$$

где  $F_0$  – площадь живого сечения сетки,  $\text{м}^2$ ;  $F_c$  – общая площадь сетки,  $\text{м}^2$ .

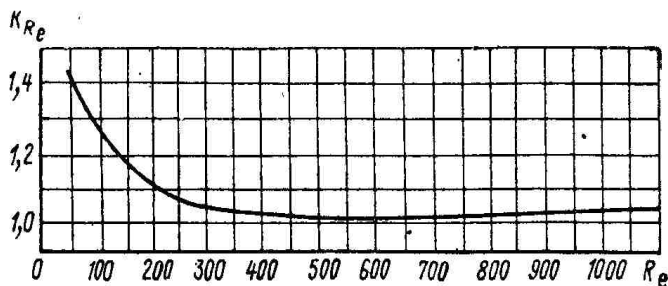


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента  $K_{Re}$  от числа Рейнольдса

Установка экрана с отверстием для отвода продуктов сгорания, площадь сечения которого меньше площади живого сечения сетки, значительно увеличит суммарное гидравлическое сопротивление горелки и нарушит её работу. В этом случае потребуются принудительная подача воздуха либо внесение изменений в конструкцию эжектора.

На работу инжекционных газогорелочных устройств инфракрасного излучения оказывает влияние угол наклона излучающей насадки по отношению к горизонту –  $\beta$ . Изменяя угол наклона насадки, можно до некоторой степени регулировать давление в камере смешения горелки, а также изменять коэффициент инжекции. График зависимости коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от избыточного давления в смесительной камере горелки  $h$  приведен на рис. 2.7.

График показывает, что если при потолочном (горизонтальном) расположении горелок ( $\beta = 180^\circ$ ) и  $h = 0$  Па коэффициент избытка воздуха имеет оптимальную величину  $\alpha = 1,05$ , то с уменьшением угла установки горелки значение  $\alpha$  растет и достигает при  $\beta = 0^\circ$  величины 1,3. Такой характер зависимости коэффициента  $\alpha$  от угла  $\beta$  объясняется действием тяги, образующейся по высоте огневых ка-

налов керамических плиток излучающей насадки и вызывающей уменьшение гидравлического сопротивления последней по мере уменьшения угла установки горелки.

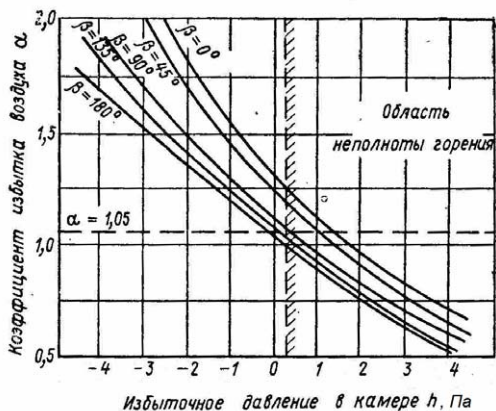


Рис. 2.7. График зависимости коэффициента избытка воздуха от избыточного давления в смесительной камере

На рис. 2.8 показана зависимость температуры  $t_n$  насадки от избыточного давления  $h$  в смесительной камере и расположения горелки (угла  $\beta$ ).

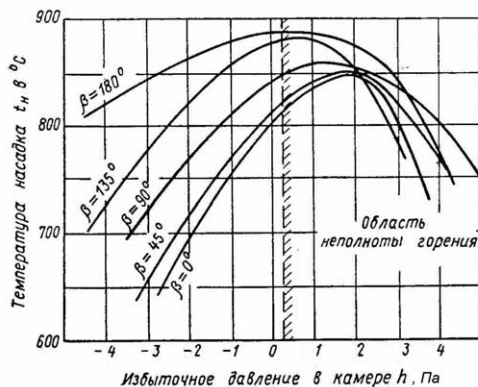


Рис. 2.8. График зависимости температуры насадки от давления в камере и расположения горелки

Из рис. 2.8 следует, что максимальная температура поверхности обеспечивается при потолочном (горизонтальном) расположении горелок ( $\beta = 180^\circ$ ) и  $h = 0$  Па. При уменьшении угла установки горелки до  $\beta = 0^\circ$  в смесительной камере образуется разрежение, благодаря чему эжектируется (подсасывается) большее количество воздуха и, следовательно, снижается температура насадки.

Таким образом, при расчете эжектора ГИИ низкого давления следует учитывать, что оптимальная величина коэффициента избытка воздуха должна обеспечиваться при горизонтальном их расположении ( $\beta = 180^\circ$ ).

## 2.5. Тепловой баланс горелки инфракрасного излучения

Наиболее полно тепловой баланс ГИИ с перфорированной керамической насадкой рассмотрен А.К. Родиным. Автор отмечает, что получить расчетным путем все необходимые для проектирования систем и установок радиационного обогрева параметры и характеристики газовых ГИИ практически нельзя. Некоторые из них определяют экспериментальным путем.

Тепловой баланс ГИИ можно выразить следующим образом:

$$Q_{\text{общ}} = Q_u + Q_{yx} + Q_n, \quad (2.15)$$

где  $Q_{\text{общ}}$  – общая тепловая нагрузка горелки, кВт;  $Q_u$  – излучаемое тепло, кВт;  $Q_{yx}$  – тепло, уносимое продуктами сгорания, кВт;  $Q_n$  – потери тепла конструкцией горелки, кВт.

Общая тепловая нагрузка горелки подсчитывается по формуле

$$Q_{\text{общ}} = V_z Q_z, \quad (2.16)$$

где  $V_z$  – расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_z$  – низшая теплота сгорания газа, МДж/м<sup>3</sup>.

Излучаемое тепло горелки складывается из тепла, излучаемого перегородками керамических плиток, поверхностью каналов  $Q_{u,кер} = Q_{u,n} + Q_{u,к}$ , металлической сеткой  $Q_{u,сет}$ , уходящими газами  $Q_{u,yx}$ , корпусом горелки  $Q_{u,к}$ :

$$Q_u = Q_{u,кер} + Q_{u,сет} + Q_{u,yx} + Q_{u,к}. \quad (2.17)$$

Конвективные потери тепла горелкой складываются из потерь тепла с уходящими газами  $Q_{yx}$  и потерь тепла корпусом горелки  $Q_{к,к}$ :



$$Q_{\kappa} = Q_{yx} + Q_{\kappa,\kappa}. \quad (2.18)$$

Таким образом, тепловой баланс горелки имеет вид:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{и.кер}} + Q_{\text{и.сет}} + Q_{\text{и.ух}} + Q_{\text{и.к}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\kappa,\kappa}. \quad (2.19)$$

Теплота, излучаемая керамической насадкой в окружающую среду или передаваемая обогреваемым объектам с температурой  $T_o$ , согласно закону Стефана – Больцмана для серых тел, может быть рассчитана по формуле

$$Q_u = \varepsilon_{\kappa} \sigma_o F_{\kappa} \left[ \left( \frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right], \quad (2.20)$$

где  $\varepsilon_{\kappa}$  – степень черноты плиток;  $\sigma_o$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $F_{\kappa}$  – эффективная площадь поверхности излучения;  $T_{\kappa}$  – температура плиток.

Величина энергии, излучаемой с 1 м<sup>2</sup> поверхности насадки горелки с сеткой без рефлектора, определяется из уравнения

$$q_u = q_1 + q_2 + q_3 - q_4, \quad (2.21)$$

где  $q_1, q_2, q_3, q_4$  – удельные потоки излучения, кВт/м<sup>2</sup>, соответственно: от излучающей насадки, от вторичного излучателя – сетки, от уходящих газов и от насадки на сетку.

Удельные потоки излучения основного и вторичного излучателя определяются по закону Стефана – Больцмана:

$$q_1 = \left( \frac{F_{\text{эф.к}}}{F_o} \right) \sigma_1 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4; \quad (2.22)$$

$$q_2 = \left( \frac{F_{\text{эф.сет}}}{F_o} \right) \sigma_2 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4, \quad (2.23)$$

где  $F_{\text{эф.к, сет}}$  – эффективная площадь поверхности излучения керамической насадки, м<sup>2</sup>;  $\sigma_{1,2}$  – приведенный коэффициент излучения, кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Для керамики  $\sigma_1 = \varepsilon_1 C_o = 4,8\text{--}5$  кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), для нихромовой сетки, многократно окисленной при температуре 973–1173 К,  $\sigma_2 = \varepsilon_2 C_o = 4$  кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $C_o$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon$  – степень черноты;  $T_{1,2}$  – среднеинтегральные температуры поверхности основного и вторичного излучателя, К.

Эффективную площадь поверхности излучения насадки, перфорированной цилиндрическими отверстиями, можно определить по формуле

$$F_{эф.к} = (1 - b\varphi_k)F_o, \quad (2.24)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от диаметра каналов  $d_{кан}$  и их глубины прогрева  $h$  до температуры, равной температуре поверхности насадки (при  $h/d_{кан} = 1$ );  $b = 0,59$ ;  $\varphi_k$  – коэффициент живого сечения каналов;  $F_o$  – суммарная площадь поверхности излучения насадки и цилиндрических каналов.

На основании вышеизложенного удельный лучистый поток от керамической огневой насадки можно выразить формулой

$$q_1 = (1 - 0,59\varphi_k)\varepsilon_1 C_o \left( \frac{T_1}{100} \right)^4. \quad (2.25)$$

Эффективную площадь поверхности излучения сетки можно определить по формуле

$$F_{эф.сет} = \varphi_{1,2} S n l K_{в.н}, \quad (2.26)$$

где  $\varphi_{1,2}$  – угловой коэффициент облученности системы тел «керамический излучатель – сетка»;  $S$  – расстояние между осями двух соседних параллельных рядов проволок, м;  $n$  – количество проволок длиной  $l$ , м;  $K_{в.н}$  – коэффициент взаимного перекрытия проволок для плетеной сетки с квадратными ячейками:

$$K_{в.н} = \frac{S}{(S + d)}. \quad (2.27)$$

Угловой коэффициент облученности  $\varphi_{1,2}$  определяется по формуле из работы Е.И. Казанцева:

$$\varphi_{1,2} = 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d}{S} \right)^2} + \frac{d}{S} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{d}{S} - 1}. \quad (2.28)$$

Для распространенных конструкций  $d = 1,2$  мм,  $S = 7,2$  мм,  $\varphi_{1,2} = 0,278$ .

Удельный лучистый поток от сетки можно выразить формулой

$$q_2 = \varphi_{1,2} S n l K_{в.н} \varepsilon_2 C_o \left( \frac{T_2}{100} \right)^4. \quad (2.29)$$

А.К. Родиным установлено, что доля излучения продуктов сгорания в ГИИ составляет в среднем 12% от общего количества из-

лучения. Таким образом, удельный поток излучения от уходящих газов составит:

$$q_3 = 0,12q_1 . \quad (2.30)$$

Удельные теплотопери с уходящими газами определяются по формуле

$$q_4 = \frac{c_{cp} B_q}{Q_u} (T_{yx} - T_o) , \quad (2.31)$$

где  $c_{cp}$  – средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания газа в диапазоне 1073–1373 К, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $B$  – объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $T_{yx}$  – температура уходящих газов, К;  $T_o$  – температура окружающего воздуха, К.

Конвективные тепловые потери корпусом горелки:

$$Q_{к.корп} = F_{корп} \alpha (T_{корп} - T_o) , \quad (2.32)$$

где  $F_{корп}$  – конвективная площадь поверхности корпуса горелки, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена конвекцией, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{корп}$  – средняя температура корпуса горелки.

Потери теплоты излучением корпусом горелки:

$$Q_{и.корп} = F_{корп} \epsilon_{корп} C_o \left[ \left( \frac{T_{корп}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] , \quad (2.33)$$

где  $\epsilon_{корп}$  – степень черноты поверхности корпуса горелки.

Таким образом, на основании балансового уравнения имеем

$$q_{общ} = q_u + q_{yx} + \left( \frac{Q_{к.корп}}{F_o} \right) + \left( \frac{Q_{и.корп}}{F_o} \right) . \quad (2.34)$$

Фактический лучистый КПД в общем случае составит:

$$\eta_l = \frac{q_u}{q_{общ}} . \quad (2.35)$$

Авторы, описывающие тепловой баланс инфракрасных горелок с керамическим излучателем, не учитывают в расчетах конвективные потери теплоты, возникающие при обтекании открытой поверхности излучателя и сетки окружающим воздухом (свободной конвекции). Эти потери теплоты значительны и составляют

$$Q_{к.кер} = F_{кер} \alpha (T_{кер} - T_o) ; \quad (2.36)$$

$$Q_{к.сет} = F_{сет} \alpha (T_{сет} - T_o) , \quad (2.37)$$

где  $F_{к\text{ер., с\text{ем}}$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена конвекцией, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{к\text{ер., с\text{ем}}$  – средняя температура поверхности теплообмена.

Если поверхность горелки обдувается ветром, эти потери теплоты многократно увеличиваются, так как теплообмен будет происходить по законам вынужденной конвекции.

Таким образом, с учетом конвективных потерь теплоты, возникающих при обтекании открытой поверхности излучателя и сетки окружающим воздухом, тепловой баланс примет следующий вид:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{и.к\text{ер}}} + Q_{\text{и.с\text{ем}}} + Q_{\text{и.у\text{х}}} + Q_{\text{и.к}} + Q_{\text{у\text{х}}} + Q_{\text{к.к}} + Q_{\text{к.к\text{ер}}} + Q_{\text{к.с\text{ем}}}. \quad (2.38)$$

Схема тепловых потоков ГИИ, учитывающая конвективные потери, представлена на рис. 2.9. Причем на рис. 2.9, *а* показана схема тепловых потоков  $Q_i$  горелки с перфорированной керамической насадкой и сеткой без экрана, а на рис. 2.9, *б* – то же самое, но для горелки, оснащенной прозрачным экраном с отверстием для отвода продуктов сгорания.

Как видно из схемы в варианте (*б*) конвективные потери теплоты, возникающие при обтекании открытой поверхности излучателя и сетки окружающим воздухом, отсутствуют.

В случае установки прозрачного экрана с внутренней поверхности экрана будет происходить лучистый и конвективный теплообмен, благодаря чему экран нагреется до определенной температуры и станет источником теплового излучения. Кроме того, экран выполненный, например, из кварцевого стекла будет пропускать около 80–87% всего излучения. Часть излучения будет поглощаться экраном, а часть – отражаться обратно на керамический излучатель. Тепловой баланс ГИИ с экраном примет следующий вид:

$$Q_{\text{общ}} = (0,8 \div 0,87) (Q_{\text{и.к\text{ер}}} + Q_{\text{и.с\text{ем}}} + Q_{\text{и.у\text{х}}}) + Q_{\text{и.к}} + Q_{\text{у\text{х}}} + Q_{\text{к.к}} + Q_{\text{и.эк\text{р}}} + Q_{\text{к.эк\text{р}}}. \quad (2.39)$$

Количество теплоты, излучаемое экраном, рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{и.эк\text{р}}} = F_{\text{эк\text{р}}} \varepsilon_{\text{эк\text{р}}} C_o \left[ \left( \frac{T_{\text{эк\text{р}}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right], \quad (2.40)$$

где  $\varepsilon_{\text{эк\text{р}}}$  – степень черноты экрана;  $F_{\text{эк\text{р}}}$  – площадь экрана, м<sup>2</sup>;  $T_{\text{эк\text{р}}}$  – средняя температура экрана, К;  $T_o$  – температура окружающего воздуха, К.

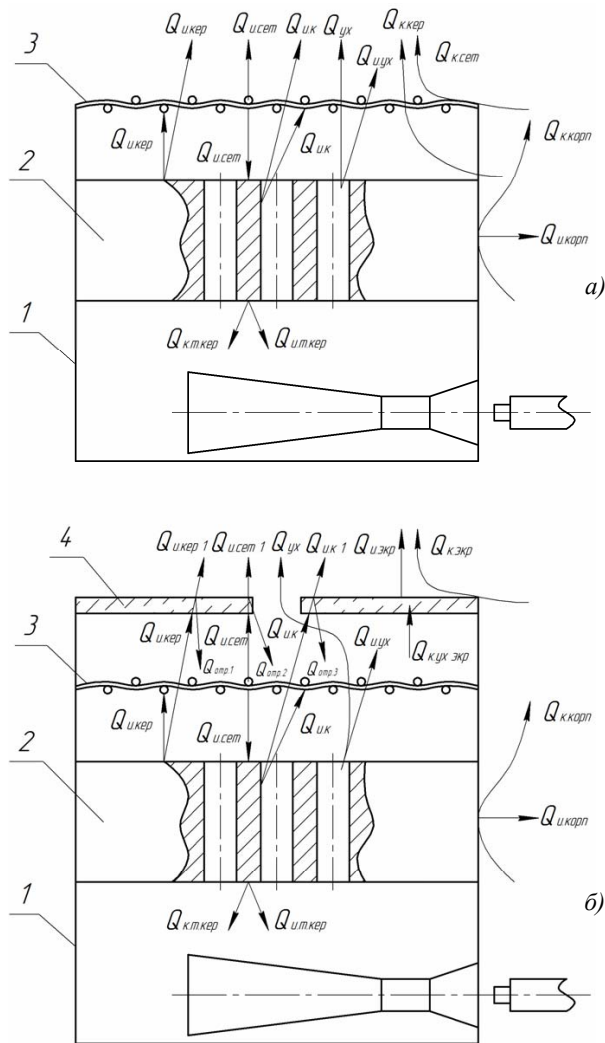


Рис. 2.9. Схема тепловых потоков ГИИ: 1 – корпус горелки; 2 – керамическая плитка; 3 – сетка; 4 – экран; а – горелка типовой конструкции; б – горелка, оснащенная прозрачным экраном с отверстием для отвода продуктов сгорания

Количество теплоты, передаваемое конвекцией от экрана окружающему воздуху, определяется по формуле

$$Q_{к.экр} = F_{экр} \alpha (T_{экр} - T_0). \quad (2.41)$$

Тепловые потери с уходящими газами в этом случае уменьшаются, так как некоторое количество теплоты передается конвекцией от продуктов сгорания экрану. Количество теплоты, передаваемое конвекцией от продуктов сгорания экрану, определяется по формуле

$$Q_{к.экр} = F_{экр} \alpha (T_{ух} - T_{экр}). \quad (2.42)$$

Известно, что значительные потери тепла с уходящими газами являются существенным недостатком ГИИ «светлого» типа при условии оснащения прибора системой организованного отвода продуктов сгорания. Следовательно, установка прозрачного экрана представляется эффективным способом снизить указанные потери теплоты.

Сравнив уравнения теплового баланса горелок, изображенных на рис. 2.9, имеем:

$$Q_{и.кер} + Q_{и.сет} + Q_{и.ух} = Q_{общ} - Q_{и.к} + Q_{ух} + Q_{к.к} + Q_{к.кер} + Q_{к.сет}; \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} & (0,8 \div 0,87) (Q_{и.кер} + Q_{и.сет} + Q_{и.ух}) = \\ & = Q_{общ} - Q_{и.к} + Q_{ух} + Q_{к.к} + Q_{и.экр} + Q_{к.экр}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Полезное (коротковолновое) тепловое излучение от горелки расположено в левой части уравнений. В случае варианта (2.44) отсутствуют конвективные потери тепла, но появляются конвективные и лучистые потери тепла экраном. Так как потери тепла экраном снижают температуру продуктов сгорания, а не температуру огневой поверхности, для увеличения доли полезного теплового излучения горелкой вариант (2.44) предпочтительней. Доля теплового излучения, задержанного прозрачным экраном, компенсируется увеличением величин, составляющих полезное тепловое излучение горелки, за счет отсутствия конвективных потерь теплоты.

Таким образом, возможность увеличения лучистого КПД горелок инфракрасного излучения путем установки прозрачного экрана, изолирующего керамический излучатель от окружающего воздуха, не противоречит известным теоретическим зависимостям.

## 2.6. Способы увеличения КПД инфракрасных горелок

Для достижения поставленной задачи необходимо рассмотреть известные пути увеличения КПД газовых ГИИ с перфорированным керамическим излучателем.

### *Установка металлической сетки над керамическим излучателем*

Металлическая сетка способствует повышению ветроустойчивости и эффективности, так как становится вторичным дополнительным излучателем. Доля излучаемой энергии возрастает на 4–14% в зависимости от удельной тепловой нагрузки. Кроме того, сетка возвращает часть эмитированных энергетических частиц назад на активную поверхность, что приводит к возбуждению частиц атомов и к последующему увеличению эмиссии фотонов излучения.

В литературе неоднократно упоминается, что даже при наличии металлических сеток передача теплоты излучением по результатам практических испытаний составляет всего лишь 45–55%, а не теоретически возможные 60–62%, как это указано в некоторых литературных источниках.

### **Оребрение поверхности керамики**

При сжигании газозоудушной смеси наблюдается неравномерность нагревания поверхности плоских керамических плиток.

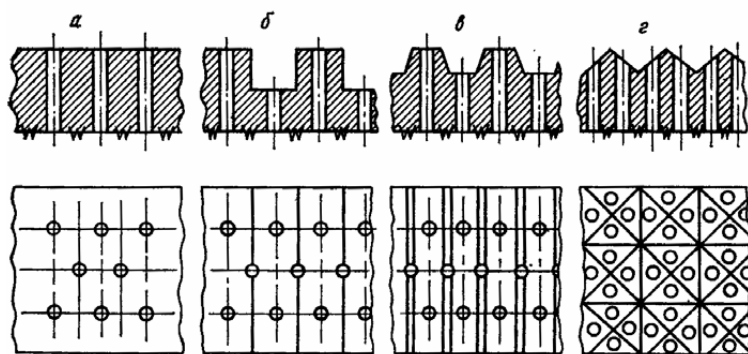


Рис. 2.10. Профили излучающей поверхности насадок:

*a* – плоская поверхность; *b* – с прямоугольными ребрами;  
*v* – с трапециевидными ребрами; *z* – с пирамидальными выступами

Появление зон с различной температурой нагрева объясняется различием в толщине перемычек между отверстиями и различием диаметров отверстий. Оребрение поверхности в виде пирамид, конусов или борозд, как показано на рис. 2.10, увеличивает площадь радирующей поверхности, исключает или значительно уменьшает неравномерность нагрева керамики, повышает полноту сгорания и долю теплоты, передаваемой в виде излучения, по сравнению с плоским излучателем.

#### *Увеличение доли излучения стенками каналов*

Исследованиями установлено, что у газовых ГИИ с керамическими насадками даже при расположении над ними металлических сеток интенсивность излучения в различных направлениях по полусфере от нормали к насадке неодинакова (рис. 2.11).

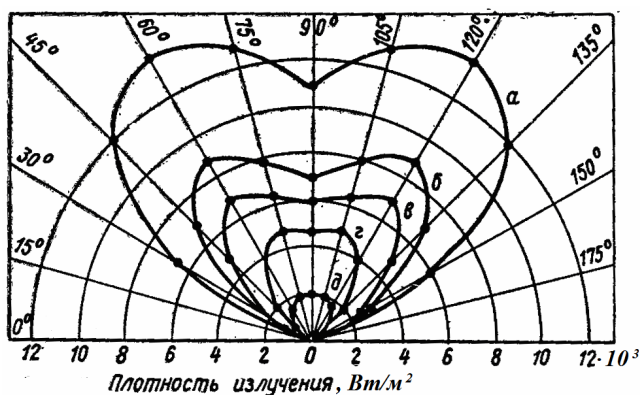


Рис. 2.11. Распределение плотности излучения в полусфере горелки (радиус полусферы, мм: а – 300; б – 400; в – 500; г – 600; д – 700)

По нормали к поверхности ( $\varphi = 90^\circ$ ) на близких расстояниях от излучающей насадки плотность излучения меньше, чем под углом 75 и 45°. При приближении к краям горелки плотность излучения снова снижается. Это объясняется тем, что стенки цилиндрических каналов в керамической насадке имеют большой перепад температур по высоте (по глубине). Вследствие этого с уменьшением угла излучения составляющая излучения от стенок каналов  $Q_{\text{ст.кан}}$  стремится к нулю, то есть



$$Q_{изл} = Q_{перег} + Q_{ст.кан} = \varepsilon(1 - \varphi_{кан}) \left[ \frac{T_{к}}{100} \right]^4 + \varepsilon\varphi_{кан} \left[ \frac{T_{к}}{100} \right]^4, \quad (2.45)$$

где  $Q_{перег}$  — теплота, излучаемая перегородками;  $Q_{ст.кан}$  — теплота, излучаемая стенками канала.

Температура стенок каналов зависит от их длины. Чем ближе к центру насадки, тем заметнее  $\varphi_{кан}$  стремится к нулю. Следовательно, излучение от стенки каналов уменьшается, то есть второй член формулы (2.45) стремится к нулю.

Зависимость (2.45) также показывает, что суммарное излучение горелки в значительной мере зависит от доли тепла, излучаемого стенками каналов. Таким образом, для увеличения лучистого КПД необходим интенсивный нагрев пламенем не только поверхности керамических плиток, но и внутренней поверхности устья каналов (рис. 2.12).

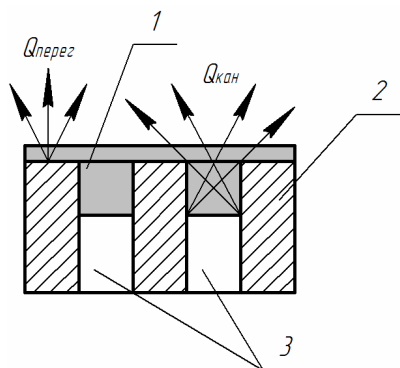


Рис. 2.12. Суммарное излучение инфракрасной горелки: 1 — фронт горения; 2 — керамическая плитка; 3 — каналы;  $Q_{перег}$  и  $Q_{ст.кан}$  — теплота, излучаемая перегородками и стенками канала

### ***Увеличение теплоотвода в стенке каналов***

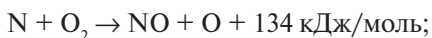
Известно, что передача части теплоты из зоны реакции в стенку при наличии теплоотвода вызывает уменьшение температуры пламени от теоретической  $t_m$  до некоторой температуры горения  $t_g$ . Также известно, что чем ниже температура горения, тем ниже температура продуктов сгорания на выходе из зоны горения. Доля прямой отдачи тепла излучением  $\eta_{рад.теор}$  тем выше, чем ниже температура газов, уходящих из зоны горения.

Увеличение теплоотвода в стенки каналов лимитируется гашением пламени в узких каналах. Это объясняется тем, что стенки поглощают теплоту в больших, по сравнению с некоторой критической величиной, количествах. Процесс гашения пламени определяется диаметром каналов, а также длиной и числом соседних каналов, теплопроводностью материала стенки и теплофизическими свойствами газозадушной смеси. Температура стенки канала влияет на пределы устойчивости по отношению к проскоку пламени, а при прохождении пламени через перфорированные насадки существенную роль играет распределение температуры по длине огневого канала, которое зависит от теплопроводности материала насадки.

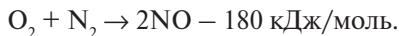
## **2.7. Образование вредных веществ при сжигании газа в горелках инфракрасного излучения**

При сжигании газа образуются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксид углерода ( $\text{CO}$ ), сажистые частицы, канцерогены и другие вещества. Из канцерогенов наиболее опасным является бензапирен. Анализ продуктов сгорания газа в ГИИ показывает, что при таком способе сжигания не обнаруживается ни сажистых частиц, ни канцерогенных веществ. В этой связи особое внимание следует уделить образованию в процессе сгорания газа  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ .

В литературе отмечается три основных источника образования оксидов азота при горении топлив: «термические», «быстрые» и «топливные»  $\text{NO}$ . При сжигании газа образование  $\text{NO}$  происходит по «термическому» и «быстрому» механизму. Образование «термических»  $\text{NO}$  соответствует разработанной Я.Б. Зельдовичем цепной схеме окисления азота, в которой активными центрами являются радикалы кислорода:



В общем виде реакция образования NO представлена уравнением



Энергия активации реакции окисления азота весьма высока – 561 кДж/моль. В результате образование основного количества NO, определяющего концентрацию в конечных продуктах сгорания, происходит при максимальной температуре. В соответствии с термической теорией интенсивность образования NO<sub>x</sub> экспоненциально зависит от температуры зоны горения, линейно – от времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур и в степени 0,5 – от концентрации кислорода в этой зоне.

Для равновесного количества NO И.Я. Сигал приводит уравнение

$$C_{\text{NO}} = 4,6 \sqrt{C_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{N}_2} \exp[-21500/RT]}. \quad (2.46)$$

Температура в зоне реакций оказывает решающее влияние на величину равновесной концентрации оксидов азота (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Зависимость концентрации оксида азота в продуктах сгорания от температуры в зоне реакции

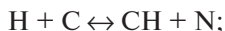
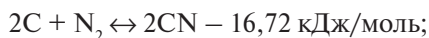
Температура, °С	700	800	1800	2500
[C <sub>NO</sub> ], мг/м <sup>3</sup>	0,38	2,54	4700	31700

Экспериментальные исследования показали существенное различие между расчётными (теоретическими) и опытными значениями выхода NO. Это объясняется следующими причинами:

- время пребывания реагентов в зоне максимальных температур ниже времени достижения химического равновесия;
- температура в ядре зоны горения ниже теоретической из-за диссоциации и наличия теплообмена излучением.

Вследствие этого выход «термических» NO<sub>x</sub> в топках энергоблоков достигает 0,8–1,5 г/м<sup>3</sup>. В промышленных и отопительных агрегатах, имеющих более низкие значения максимальной температуры и значительный темп охлаждения, выход термических NO составляет 0,1–0,2 г/м<sup>3</sup>. В малых топках термические NO не образуются, а выход NO, равный 0,1–0,2 г/м<sup>3</sup>, объясняется «быстрыми» NO.

Наиболее вероятным механизмом образования «быстрых» NO является механизм, предложенный С. Фенимором:

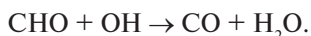
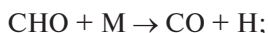
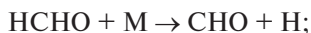
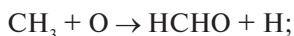


«Быстрые» NO образуются в начальной области фронта пламени в интервале температур 1000–1500 К. Выход «быстрых» NO при горении газа составляет 100–120 мг/м<sup>3</sup>.

Зависимость выхода NO<sub>x</sub> от коэффициента избытка воздуха α имеет максимум в области бедных смесей. Обычно максимум наблюдается при 3% избытке кислорода, что соответствует 15% избытка воздуха. С увеличением (или уменьшением) коэффициента α выход NO<sub>x</sub> быстро уменьшается.

Схема образования и выгорания CO имеет следующий характер: на начальном участке сгорания идёт накопление CO, а затем – окисление по длине факела или камеры сгорания. При горении метана на начальном относительно коротком участке происходит накопление CO до 2–3%, а на последующем участке – постепенное снижение концентрации до конечных значений в зависимости от совершенства организации процесса горения.

Накопление CO происходит в результате быстрых цепных реакций:



Высокие концентрации CO сохраняются, если происходит «замораживание» продуктов сгорания, то есть быстрое охлаждение в результате соприкосновения с относительно холодными поверхностями.

Окисление СО в результате реакции  $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$  не играет заметной роли, ввиду очень малой скорости. Основной реакцией, по которой выгорает оксид углерода, является реакция с гидроксидом:  $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ . Поэтому добавки пара и воды, увеличивающие выход радикала ОН, способствуют снижению содержания СО.

Качество сжигания газа в ГИИ оценивается по содержанию в продуктах сгорания СО и  $\text{NO}_x$ . По ГОСТ 25696-83\* допускается содержание СО в сухих неразбавленных продуктах сгорания не более 0,02%, а  $\text{NO}_x$  – не более 0,005% по объему ( $\alpha = 1,0$ ) для ГИИ без организованного отвода продуктов сгорания.

Как показывают многочисленные исследования, содержание СО в продуктах сгорания при сжигании газа в ГИИ, работающих в расчетном режиме, не превышает 0,01–0,02%, а содержание  $\text{NO}_x$  – 40–50 мг/м<sup>3</sup>. С этой точки зрения ГИИ являются газогорелочными устройствами с максимальной полнотой сжигания топлива и минимальной эмиссией оксидов азота.

## **Выводы по разделу 2**

1. Снижение теоретической температуры горения газа у поверхности керамического перфорированного излучателя с увеличением коэффициента избытка воздуха мало влияет на температуру в зоне «керамика – пламя», так как теплоотвод от пламени не зависит от избытка воздуха в смеси.

2. Гидравлическое сопротивление отверстия в прозрачном экране изменит работу эжектора горелки. В этом случае необходима принудительная подача воздуха либо использование газа среднего давления.

3. Увеличение коэффициента избытка воздуха повысит устойчивость горелки по отношению к проскоку.

4. Прозрачный экран препятствует интенсивным конвективным теплопотерям, возникающим при обтекании окружающим воздухом излучающей поверхности.

5. Прозрачный экран, выполненный из кварцевого термостойкого стекла, будет задерживать около 20% всей излученной плитками теплоты.

6. Разработана тепловая модель процесса горения.

## Контрольные вопросы к разделу 2

1. Каковы цель и задачи теоретических исследований ГИИ?
2. Что улучшается при установке на горелку прозрачного экрана?
3. Что ухудшается при установке на горелку прозрачного экрана?
4. Каким образом происходит проскок пламени?
5. Как можно предотвратить проскок пламени?
6. Какие факторы способствуют проскоку пламени?
7. Какие факторы препятствуют проскоку пламени?
8. Как влияет установка прозрачного экрана на гидравлический режим работы ГИИ?
9. Как влияет на работу горелок угол наклона излучающей насадки по отношению к горизонту?
10. Какие отличительные особенности имеет предложенная схема тепловых потоков ГИИ?
11. Почему необходимо учитывать конвективные теплопотери?
12. Перечислите способы повышения КПД горелок инфракрасного излучения.
13. Какие вредные вещества образуются в инфракрасных горелках?
14. Поясните механизм образования оксидов азота.
15. В результате протекания каких реакций образуется оксид углерода?
16. Какие требования предъявляются к содержанию оксидов азота и углерода в продуктах сгорания?

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. Экспериментальные стенды

Для проведения исследований применялся стенд с записью результатов на компьютер. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 3.1.

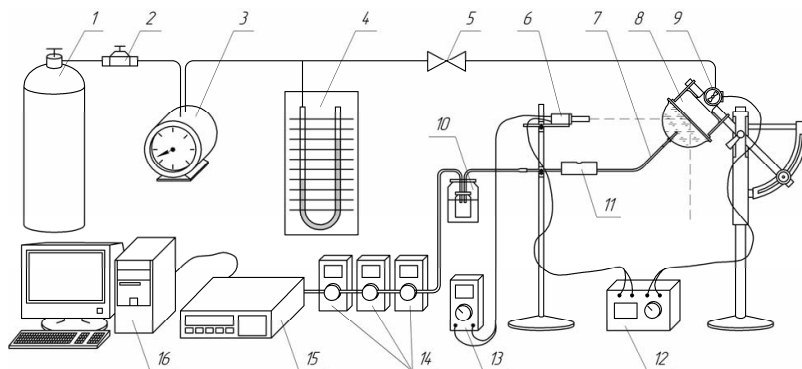


Рис. 3.1. Схема стенда для исследования горелок

Стенд содержит 50-литровый баллон 1, регулятор давления газа 2, газовый счетчик 3, U-образный водяной манометр 4, кран 5, инфракрасный датчик 6, пробоотборник 7, инфракрасную горелку 8, вентилятор 9, сборник конденсата 10, охладитель продуктов сгорания 11, источник тока 12, измерительный прибор 13 для регистрации пирометрической температуры излучателя горелки, газоанализаторы МГЛ-19.ХА 14, газоанализатор «Автотест-02» 15, подключенный к компьютеру 16.

Сжиженный углеводородный газ из баллона 1 через регулятор давления 2 и счетчик 3 поступает в горелку 8. Проба продуктов сгорания отбирается пробоотборником 7 через отверстие в экране, проходит через охладитель 11 и сборник конденсата 10. Анализируется проба с помощью газоанализаторов МГЛ-19.ХА 14 и газоанализатора «Автотест-02» 15. Результаты опыта регистрируются компьютером 16. Температура матрицы определяется с помощью инфракрасного датчика 6 и измерительного прибора 13. Датчик 6

установлен на расстоянии 0,5 м от плоскости излучателя горелки. Горелка 8 закреплена на штативе, позволяющем изменять её угловое положение относительно датчика.

В качестве объектов исследования выбраны горелки ГИИ-1,85 «Звёздочка» и ГИИВ-3,65 «Унифицированная» производства ОАО «Казанский завод газовой аппаратуры – ВЕСТА». Конструктивно эти горелки относятся к наиболее простым и распространенным горелкам инфракрасного излучения «светлого» типа. Устройство горелок изображено на рис. 3.2.

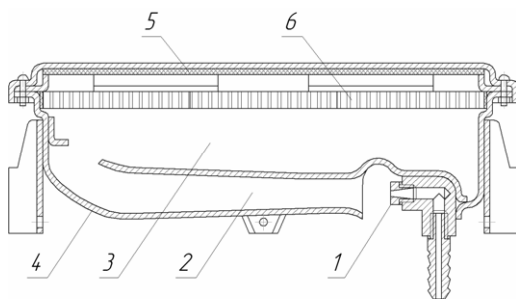


Рис. 3.2. Устройство горелки инфракрасного излучения:  
1 – сопло; 2 – эжектор; 3 – распределительная камера; 4 – корпус;  
5 – сетка; 6 – керамические плитки

Излучающая матрица горелки ГИИ-1,85 содержит три, а ГИИВ-3,65 – десять керамических плиток 6 с диаметром каналов 1 мм. Над матрицей на расстоянии 10 мм размещена нихромовая сетка 5 с размерами ячеек 5×5 мм. Основные технические данные горелок приведены в табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

#### Технические данные горелок

№	Наименование показателя	ГИИ-1,85	ГИИВ-3,65
1	Номинальная тепловая мощность горелки, кВт	1,85	3,65
2	Номинальное давление сжиженного газа, Па	2940	2940
3	Температура излучающей поверхности горелки, не менее	800°С	800°С
4	Содержание оксидов азота в продуктах сгорания при $\alpha = 1$ , мг/м <sup>3</sup> , не более	40	40



№	Наименование показателя	ГИИ-1,85	ГИИВ-3,65
5	Лучистый коэффициент полезного действия, %, не менее	35	35
6	Индекс окиси углерода в продуктах сгорания при $\alpha = 1$ , % (по объему) / мг/м <sup>3</sup> , не более	0,02/250	0,02/250
7	Диаметр отверстия газового сопла, мм	0,8	1,05
8	Расход сжиженного газа, м <sup>3</sup> /ч	0,07±15%	0,138±15%

Чтобы предотвратить доступ окружающего воздуха в зону горения, излучатель закрыли экраном из жаропрочного стекла с отверстием в центре для отвода продуктов сгорания. Для подачи избыточного объёма воздуха горелку оснастили вентилятором (рис. 3.7).

Для обеспечения работы горелки ГИИ-1,85 «Звездочка» на бедных газоздушных смесях с коэффициентом  $\alpha > 1,1$  горелка была оснащена системой принудительной подачи воздуха с вентилятором. Поскольку это усложняет конструкцию горелки и ведёт к дополнительным затратам на электроэнергию, то необходимо иное решение. Один из вариантов – использование газа среднего давления. В этом случае вследствие увеличения кинетической энергии струи газа процесс эжекции окружающего воздуха станет более интенсивным, а повышение давления позволит получить расход газа, соответствующий номинальному, при меньшей площади сечения сопла. В данных условиях будет приготавливаться бедная газоздушная смесь, что позволит полностью отказаться от системы принудительной подачи воздуха. Недостатком такого решения является повышение требований безопасности внутренних газопроводов.

Для изучения работы горелок на среднем давлении экспериментальный стенд был переоборудован. Изменения заключались в следующем: установлен соответствующий регулятор давления и манометр, газовый счётчик и вентилятор были исключены из схемы.

### 3.2. Методики исследования

Цель исследований – определить зависимость излучательной способности горелок и содержания вредных веществ в продуктах сгорания от величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и других факторов.

Опыты проводились в слабоосвещенном, вентилируемом помещении. Величина коэффициента  $\alpha$  изменялась в пределах  $\alpha = 1,0-2,0$  при фиксированном значении давления газа. Давление газа при исследовании работы горелок на газе низкого давления изменялось ступенчато от 1800 до 3600 Па. В процессе опыта регистрировались величина инфракрасного потока (пирометрическая температура поверхности излучателя) и состав продуктов сгорания при каждом значении коэффициента  $\alpha$  и давления газа (тепловой мощности горелки). Исследования проводились при трех характерных положениях горелки: угол  $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 180^\circ$  от плоскости излучателя к поверхности пола.

Низшая теплота сгорания смеси горючих газов определялась по формуле

$$Q_n^c = \sum Q_{ni}^c \cdot n_i, \quad (3.1)$$

где  $Q_{ni}^c$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го компонента смеси, МДж/м<sup>3</sup>;  $n_i$  – процентное содержание  $i$ -го горючего компонента в смеси.

Плотность газовой смеси рассчитывалась по формуле

$$\rho_{st} = \sum \rho_i \cdot n_i \quad (3.2)$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $n_i$  – процентное содержание  $i$ -го компонента в смеси.

Объём газа, израсходованный горелкой за опыт, приводился к нормальным условиям с помощью формулы

$$Q_0 = \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{B + P}{760} \cdot Q, \quad (3.3)$$

где  $t$  – температура газа, °С;  $B$  – барометрическое давление, мм рт. ст.;  $P$  – давление газа, мм рт. ст.;  $Q$  – объём израсходованного газа по счётчику, дм<sup>3</sup>.

Опытные величины концентраций СО и NO<sub>x</sub> приводились к составу сухих продуктов сгорания при нормальных условиях и  $\alpha = 1$ . Концентрация ( $K_n$ ) при нормальных условиях в мг/м<sup>3</sup> вычислялась по формуле

$$K_n = K_p \frac{(273 + t) \cdot p_n}{293 \cdot p_p}, \quad (3.4)$$

где  $K_p$  – измеренная концентрация вредного вещества в условиях опыта.

Пересчёт объёмных процентных концентраций вредностей в массовые ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) производился по формулам:

- для оксида углерода

$$K_{\text{CO}} = 12500 \times \text{CO};$$

- для оксидов азота

$$K_{\text{NO}_x} = 20540 \times \text{NO}_x,$$

где  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$  – объёмное содержание веществ в продуктах сгорания.

Перевод массовых концентраций вредностей в объёмные (%) производился по формулам:

- для оксида углерода

$$\text{CO} = 8 \times 10^{-5} \times K_{\text{CO}};$$

- для оксидов азота

$$\text{NO}_x = 4,86 \times 10^{-5} \times K_{\text{NO}_x},$$

где  $K_{\text{CO}}$  и  $K_{\text{NO}_x}$  – массовое содержание веществ в продуктах сгорания.

Перевод содержания веществ в частях на миллион (participle per million) в объёмное содержание (%) производился по формуле

$$1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-4}\%,$$

где ppm – содержание веществ в частях на миллион.

Перевод содержания веществ в частях на миллион (participle per million) в массовую концентрацию производился по соотношениям:

- для оксида углерода

$$1 \text{ ppm CO} = 1,25 \text{ мг}/\text{м}^3;$$

- для оксидов азота

$$1 \text{ ppm NO}_x = 2,05 \text{ мг}/\text{м}^3.$$

Установка экрана из жаропрочного стекла приводит к необходимости использовать газ среднего давления. Для опытов с использованием газа среднего давления необходимо определить диаметр сопла и другие конструктивные параметры горелки. Сделать это можно, используя методику конструктивного расчёта атмосферных горелок, предложенную А.А. Иониним.

Расчёт конструктивных параметров газовых ГИИ включает расчёт излучающей панели (насадки) и расчёт эжекционного смесителя.

Исходными данными для расчёта являются:

- состав газа;
- теплота сгорания газа,  $Q_n^c$ , МДж/м<sup>3</sup>;
- давление газа,  $p_{газ}$ , Па;
- расход газа,  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/ч или тепловая мощность горелки,  $N$ , кВт;
- температура газа и воздуха;
- коэффициент избытка воздуха,  $\alpha$ ;
- коэффициент массовой эжекции,  $u$ ;
- коэффициент объёмной эжекции,  $us$ .

Расчёт размеров излучающей панели обычно ведется исходя из заданной номинальной тепловой мощности горелки –  $N_o$ , кВт. При этом необходимо знать номинальную тепловую мощность перфорированной керамической плитки, которая будет использоваться в излучающей панели. Например, Казанский ЗГА «Веста» изготавливает плитки размером 71×110×12 мм (площадь 78 см<sup>2</sup>) с диаметром каналов 1 мм. Номинальная мощность плитки  $q_n = 0,62$  кВт. Удельная номинальная мощность 8 Вт/см<sup>2</sup> или 80 кВт/м<sup>2</sup>.

Необходимое количество плиток  $n = N_o / q_n$ . Затем принимается вид расположения плиток и находятся размеры излучающей панели.

Расчёт конструктивных параметров смесителя ведётся для эжекционной трубки оптимальной формы, так как необходимо создавать газоздушную смесь с коэффициентом  $\alpha = 1,02–1,07$ . Это значит, что при работе горелки на природном газе необходимо подсасывать 10-кратный, а при работе на сжиженном газе – 26-кратный объём воздуха. Обеспечение необходимого состава смеси – одна из главных задач при проектировании ГИИ.

Конструктивный расчёт базируется на основном уравнении атмосферной горелки:

$$(1+u) \cdot (1+us) = \frac{2\bar{F}}{k + k_1 \cdot \bar{F}_1^2}, \quad (3.5)$$

где  $\bar{F} = F_r / F_c$  – основной параметр эжектора;  $\bar{F}_1 = F_r / F_0$  – параметр горелки;  $F_r$  – площадь сечения горловины, см<sup>2</sup>;  $F_c$  – площадь сечения сопла, см<sup>2</sup>;  $F_0$  – суммарная площадь сечения отверстий насадки;  $k$  – коэффициент, учитывающий потери энергии в эжекторе;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий потери энергии в головке

горелки;  $u$ ,  $us$  – соответственно массовый и объёмный коэффициенты эжекции;  $s = \frac{\rho_{\text{газа}}}{\rho_{\text{возд}}}$  – относительная плотность газа.

Коэффициент, учитывающий потери энергии в головке горелки, рассчитывается по формуле

$$k_1 = \xi_o + 2 \frac{T}{273} - 1, \quad (3.6)$$

где  $\xi_o = \frac{1 - \mu_o^2}{\mu_o^2}$  – коэффициент сопротивления сопла;  $T$  – температура подогрева газозоодушнoй смеси.

Коэффициенты эжекции рассчитываются по следующим формулам:

$$u = \frac{M_2}{M_1}, \quad (3.7)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – массовые расходы газа, кг/с;

$$us = \frac{Q_2}{Q_1} = \alpha \cdot V_o = \frac{M_2 / \rho_B}{M_1 / \rho_r}, \quad (3.8)$$

где  $Q_1$  – объёмный расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_2$  – объёмный расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $V_o$  – объём теоретически необходимого воздуха, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\rho_B$ ,  $\rho_r$  – плотности соответственно воздуха и газа, кг/м<sup>3</sup>.

Зная относительную плотность газа, объём теоретически необходимого воздуха и вычислив по формуле (3.5) массовый коэффициент эжекции, можно найти коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{us}{V_o}. \quad (3.9)$$

Расчёт расхода газа, истекающего из сопла, производится по формуле

$$Q_1 = \frac{0,36 \cdot F_c \cdot \mu_c \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_r}}{\sqrt{\rho_r}}, \quad (3.10)$$

где  $F_c$  – площадь сечения сопла, см<sup>2</sup>;  $\mu_c$  – коэффициент расхода сопла;  $\Delta P_r$  – избыточное давление газа перед горелкой, Па;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Диаметр сопла  $d_c$  рассчитывается по формуле

$$d_c = 1,13 \sqrt{F_c}. \quad (3.11)$$

Диаметр горловины эжектора рекомендуется брать

$$d_e = (12-16) d_c.$$

Диаметры конфузора и диффузора:

$$d_k = d_d = (1,5-2,0) d_r.$$

Длина диффузора (принимая угол раскрытия  $\beta = 6^\circ$ ):

$$\ell_e = (d_d - d_r) / 2 \operatorname{tg} \beta / 2.$$

Длина конфузора:

$$\ell_k = (1,5-2,2) d_r.$$

Скорость газовой смеси в отверстиях насадки:

$$w = \frac{Q_1(1+us)}{F_0}. \quad (3.12)$$

Допустимые величины скорости смеси в отверстиях керамической плитки лежат в пределах 0,1–0,16 м/с.

### 3.3. Характеристика аппаратного и приборного оснащения

В ходе экспериментальных исследований использовались следующие приборы и аппаратура:

**Регулятор давления газа** РДСГ-1-1,2 предназначен для поддержания заданного давления газа перед горелкой. Использовался модифицированный регулятор. Давление газа задавалось в пределах 1800–3600 Па.

**Счетчик газовый барабанный** ГСБ-400 предназначен для лабораторных измерений объемов газов. Технические данные:

- номинальный расход 0,4 м<sup>3</sup>/ч;
- пределы измерения 0,02–0,6 м<sup>3</sup>/ч;
- класс точности 1,0.

**Газоанализаторы** серии МГЛ-19.ХА (зав. № 1091-2-08, акт поверки от 08.05.2008 г., зав. № 1090-2-08, акт поверки от 07.05.2008 г., зав. № 1092-2-08, акт поверки от 08.05.2008 г.) предназначены для раздельного измерения массовых концентраций СО, NO, NO<sub>2</sub> в воздухе рабочей зоны. Технические характеристики газоанализаторов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

## Технические характеристики газоанализаторов МГЛ-19.ХА

№	Измеряемый компонент	Диапазон измерения, мг/м <sup>3</sup>	Цена деления	Погрешность	
				абсолютная	относительная
1	Оксид углерода	0–200	0,1	$\pm(2+0,1C_x)$	–
2	Оксид азота	0–30	0,1	–	$\pm 25\%$
3	Диоксид азота	0–20	0,1	–	$\pm 25\%$

Примечание.  $C_x$  – измеренное значение концентрации.

**Газоанализатор «Автотест-02 CO – CO<sub>2</sub> – CH – O<sub>2</sub> – NO<sub>x</sub> –  $\lambda$  – T»** (заводской № 6606, акт поверки от 14.02.2006 г.) предназначен для одновременного определения содержания оксида углерода, диоксида углерода, углеводородов, кислорода, оксидов азота, а также частоты вращения коленчатого вала двигателя и вычисления  $\lambda$ -параметра (коэффициента избытка воздуха) в отработавших газах автомобилей, работающих на бензине или газовом топливе. Технические характеристики газоанализатора приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

## Технические характеристики газоанализатора «Автотест-02»

№ п/п	Измеряемый компонент	Диапазон измерения, %, ppm	Цена деления	Участок диапазона измерений	Погрешность	
					абсолютная	относительная
1	Углеводороды	0–5000 ppm	10 ppm	0–1000 1000–5000	$\pm 50$ ppm –	– $\pm 5\%$
2	Оксид углерода	0–10,0%	0,01%	0–5% 5–10%	$\pm 0,25$ –	– $\pm 5\%$
3	Диоксид углерода	0–25%	0,01%	0–10% 10–25%	$\pm 0,5\%$ –	– $\pm 5\%$
4	Кислород	0–25%	0,01%	0–10% 10–25%	$\pm 0,5\%$ –	– $\pm 5\%$
5	Оксиды азота	0–5000 ppm	10 ppm	0–1000 1000–5000	$\pm 50$ ppm –	– $\pm 5\%$
6	$\lambda$ -параметр	0,5–2,00	0,001	–	Не нормируется	

Для обеспечения более точных измерений газоанализатор был подключен к компьютеру, оснащенный соответствующим про-

граммным обеспечением, позволяющим фиксировать изменение состава продуктов сгорания во времени с точностью до секунды.

**Вентилятор осевой** предназначен для формирования бедной газоз-воздушной смеси путём регулируемой подачи избыточного воздуха.

**Регулятор напряжения бытовой РНБ-1** предназначен для изменения напряжения в пределах 0–250 В. Использовался для регулирования частоты вращения вентилятора.

**Мультиметр цифровой ДТ-832** предназначен для измерения постоянного и переменного напряжения, постоянного тока, сопротивления. Использовался для измерения напряжения, создающегося на выводах инфракрасного датчика. Технические данные:

- используемые пределы измерения (2000 мВ)–(20 В);
- точность на данных пределах измерения ( $\pm 0,5\%$ )–( $\pm 0,25\%$ ).

**Инфракрасный датчик** направленного действия на основе фоторезистора ФР1-3. Датчик предназначен для приема инфракрасного излучения. Использовался для регистрации пирометрической температуры излучателя. Технические характеристики фоторезистора приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Технические характеристики фоторезистора ФР1-3

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Темновое сопротивление $R_t$ , кОм	100
2	Темновой ток $I_t$ , мкА	Не более 7,5
3	Световой ток при рабочем напряжении 3 В и освещенности 300 лк $I_e$ , мкА	Не менее 750
4	Кратность изменения сопротивления при освещенности 200 лк от источника света	Не менее 1,1
5	Частота улавливаемого излучения, Гц	6–12
6	Длина волны улавливаемого излучения, мкм	1–3,2

**Термометр цифровой малогабаритный ТЦМ 1510** (заводской № 2106, акт поверки от 11.08.2007 г.) предназначен для измерений температуры различных неагрессивных жидких, твердых и газообразных сред в диапазоне температур от 0 до 1200°С. Характеристики прибора приведены в табл. 3.5.



Таблица 3.5

## Технические характеристики термометра ТЦМ 1510

Модификация, исполнение, НСХ ПТ	Рабочий диапазон температур, °С	Допускаемая погрешность, %	Разрешающая способность, °С
ТЦМ 1510-03-00 ХА(К)	0...1200	±1,5	1,0

### 3.4. Планирование эксперимента

Теория планирования эксперимента формулирует приемы и способы оптимальной организации экспериментирования при исследованиях объектов самой разной физической природы. Применение методов и приемов этой теории позволяет эффективно, с наименьшими затратами решать многие практически важные исследовательские задачи: построение по опытным данным математических моделей объектов и явлений, оптимизацию процессов, проверку различных предположений об их свойствах. Эффективность указанных методов доказана на многочисленных примерах использования их в различных областях науки и техники: физике и химии, биологии и медицине, радиотехнике и электронике, автоматике и вычислительной технике, в задачах организации производства и технико-экономических исследованиях.

Главные цели планирования эксперимента заключаются в достижении его максимальной точности и минимальной стоимости. Однако достижение максимальной точности требует увеличения числа опытов, что приводит к повышению стоимости эксперимента. Поэтому возникает задача оптимизации в постановке эксперимента.

Методически опыты могут быть поставлены двояко. Традиционный метод постановки опытов состоит в изменении одного какого-либо фактора при сохранении всех других факторов, влияющих на процесс, постоянными. Этот метод постановки опытов известен под названием метода однофакторного эксперимента. При такой методике взаимное влияние факторов учесть невозможно.

Оптимальное планирование эксперимента предполагает одновременное изменение всех факторов, влияющих на процесс, что позволяет сразу установить силу взаимодействия факторов и со-

кратить общее число опытов. Такой метод постановки опытов называется методом многофакторного планирования эксперимента. В результате исследований получают не сечения статических характеристик объекта, как это имеет место в классическом однофакторном методе, а функциональную зависимость выхода объекта от всех факторов, что очень существенно.

Сущность метода заключается в следующем. Объект исследования рассматривается как «черный ящик». Его входы называют факторами, а выходы – откликами. Целью исследования является построение модели статики объекта, то есть функции отклика.

По результатам исследования составляется табл. 3.6.

Таблица 3.6

Таблица эксперимента

Номера опытов	Факторы					Показатель цели
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	...	$X_k$	
1	$X_{12}$	$X_{21}$	$X_{31}$	...	$X_{k1}$	$Y_1$
2	$X_{13}$	$X_{22}$	$X_{32}$	...	$X_{k2}$	$Y_2$
...	...	...	...	...	...	...
N	$X_{1N}$	$X_{2N}$	$X_{3N}$	...	$X_{kN}$	$Y_N$

В этой таблице представлена так называемая матрица планирования эксперимента, в которой любая строка представляет собой значения всех факторов в соответствующем опыте, а любой столбец – значения одного из факторов во всех опытах. В табл. 3.6 содержится объективная информация о свойствах объекта исследования, определявших зависимость параметра отклика от факторов  $X_i$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k). \quad (3.13)$$

Ясно, что описанный метод прост с методологической точки зрения, не требует очень глубоких знаний объекта исследования, его свойств. Достаточно лишь дать перечень существенных параметров, определяющих объект, и установить, что может служить показателем цели при исследовании объекта. Не изучая механизма взаимодействия факторов  $X_1, \dots, X_k$  при их влиянии на  $Y$ , исследователь может экспериментально найти зависимость (3.13).

Этот метод может использоваться и при проведении «машинного эксперимента», при котором исследуется не сам физический объект, а его математическая модель.

Для составления матрицы планирования необходимо выяснить, какие значения факторов использовать при проведении эксперимента и в какой последовательности их чередовать при переходе от одного опыта к другому. Последнее имеет принципиальное значение, так как от способа варьирования значений факторов зависит возможность оценки степени влияния отдельных факторов в многофакторном эксперименте.

Различают следующие виды исследовательских задач.

**Задача определения оптимального состава многокомпонентной системы.** Такая задача весьма характерна для решения проблем химической и металлургической технологий. Например, требуется разработать новый сплав с большой твердостью. Возникает задача, на основе какого металла и с какими легирующими добавками делать этот сплав. Вопрос определения оптимального процентного содержания каждого элемента еще не ставится. Ставится задача: из чего делать? Это и есть задача определения оптимального состава многокомпонентной системы.

**Задача оптимизации,** то есть отыскания оптимальных условий протекания технологического процесса или оптимальных значений параметров технического устройства, при которых какой-либо важный показатель цели достигает максимального значения.

**Задача идентификации,** то есть отыскания зависимости параметра цели от параметров объекта в виде функции (3.13), которую называют функцией цели. Задача идентификации решается довольно часто. Найденная функция цели может использоваться для довольно простого анализа свойств объекта исследования, для решения задачи оптимизации, для выработки рекомендаций по проектированию объектов данного типа.

**Задача отсеивания.** При решении этой задачи необходимо выяснять, какие из перечисленных параметров объекта существенно влияют на параметр цели, а какие — несущественно. Несущественно влияющие параметры в дальнейшем не рассматриваются как факторы при более детальном изучении объекта.

В процессе эксперимента каждый фактор может принимать одно из нескольких фиксированных значений. Эти значения называются уровнями. Сочетание определенных уровней всех факторов определяет одно из возможных состояний объекта. Множество возможных сочетаний уровней факторов определяет множество состояний данного объекта и, следовательно, число возможных различных опытов, равное

$$N = p^k, \quad (3.14)$$

где  $p$  – число уровней факторов;  $k$  – число факторов.

Для уменьшения размерности факторного пространства и упрощения модели объекта уменьшают число факторов путем отсеивания малосущественных. Факторы должны быть управляемыми, независимыми и совместимыми. Это означает, что факторы не должны быть функциями других факторов, должна существовать возможность установления фактора на выбранных уровнях независимо от уровня других факторов, а все комбинации уровней факторов должны давать осуществимые и безопасные для объекта режимы.

#### ***Определение числа опытов и выбор плана эксперимента***

В нашем случае выходными параметрами исследуемого объекта – ГИИ, оснащенной прозрачным экраном, являются температура излучателя  $t$  и концентрация вредных веществ в продуктах сгорания  $C$ .

На результаты эксперимента, проводимого на лабораторном стенде (рис. 3.1), могут влиять следующие факторы:

- 1) расход газа;
- 2) расход воздуха;
- 3) состав газа;
- 4) давление газа;
- 5) состав окружающей среды;
- 6) физическое состояние окружающей среды;
- 7) солнечная радиация;
- 8) коэффициент избытка воздуха;
- 9) конструкция горелки;
- 10) равномерность нагрева керамических плиток;
- 11) наличие прозрачного экрана.

Рассмотрим подробнее, как каждый из перечисленных факторов влияет на выходные параметры цели.

1. Расход газа оказывает влияние на тепловую мощность горелки и тем самым на температуру излучателя.

2. Расход воздуха оказывает непосредственное влияние на процесс горения, но, так как в ходе эксперимента температура излучателя фиксировалась для конкретного значения коэффициента избытка воздуха, он оставался постоянным.

3. Состав сгораемого газа не менялся.

4. От давления зависит расход газа горелкой. От расхода газа зависит тепловая мощность горелки, а значит и температура излучателя.

5. Состав окружающей среды менялся незначительно, поэтому данный фактор не учитываем.

6. Физическое состояние окружающей среды характеризуется следующими показателями: атмосферное давление, температура, влажность, подвижность окружающего воздуха. Данные параметры незначительно менялись в процессе проведения опытов, и поэтому их влияние на результаты экспериментов можно не учитывать.

7. Солнечная радиация может в значительной степени изменять показания инфракрасного датчика. Для устранения влияния данного фактора на ход эксперимента помещение, где проводились опыты, было затенено.

8. При неизменном давлении газа перед горелкой коэффициент избытка воздуха является основным фактором, влияющим на температуру излучателя.

9. Конструкция горелки оставалась неизменной.

10. Равномерность нагрева керамических плиток определяет полезную площадь излучения, а также влияет на полноту сжигания газа. Данный фактор не учитывается, так как в ходе проведения эксперимента поверхность излучателя раскалялась равномерно.

11. Наличие над горелкой стеклянного экрана, служащего для локализации продуктов сгорания, является дополнительным гидравлическим и термическим сопротивлением. Поскольку экран присутствовал во всех сериях опытов, то этот фактор не влияет на выходные параметры цели.

Таким образом, на конечные выходные параметры цели большое влияние оказывают следующие факторы:

- 1)  $k_1$  – коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ ;
- 2)  $k_2$  – давление газа  $P$ , кПа.

На основе перечисленных факторов запишем функции цели:

$$t = f(\alpha, P); \quad C = f(\alpha, P). \quad (3.15)$$

Перед началом эксперимента необходимо выбрать его план, то есть определить, какие сочетания уровней факторов следует реализовать и в каком порядке. Это очень важный этап в рассматриваемом методе, поскольку этим, по сути, ограничивается класс регрессионных моделей, среди которых отыскивается модель объекта. Следовательно, требуется задать общий вид отыскиваемой модели: линейная, нелинейная с эффектами взаимодействия, квадратичная и т. п.

Математическая модель чаще всего представляется в виде полинома отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция.

Предварительными опытами установлено, что для получения объективной картины целевых зависимостей необходимое количество уровней варьирования для фактора  $k_1$   $p = 6$ . Для фактора  $k_2$ , учитывая пределы регулирования горелок, для подтверждения зависимости  $t_i = f(\alpha)$  на минимальной, номинальной и максимальной мощности достаточно  $p = 3-4$ . Как видно, в нашем случае, число уровней факторов различно, причем одновременно измеряются значения двух функций цели.

Построение модели, содержащей степени факторов, требующих иметь такую систему планирования, в которой каждый фактор будет принимать хотя бы три разных уровня, содержит слишком большое число опытов, а при  $k > 5$  становится совершенно неприемлемым для практики.

При двухфакторном эксперименте второй фактор придется варьировать также на шести уровнях и общее количество измерений составит  $N = p^k = 6^2 = 36$ .

Сократить число опытов можно, если воспользоваться композиционными или последовательными планами, предложенными Боксом и Уилсоном. Ядро таких планов составляет полный фак-

торный эксперимент типа  $2^k$  с добавлением нулевой  $n_0$  и  $2k$  звездных точек:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 2^2 + 2 \cdot 2 + 1 = 9. \quad (3.16)$$

Длина звездного плеча рассчитывается по формуле

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{N_0 N} - N_0}{2}} = \sqrt{\frac{\sqrt{4 \cdot 9} - 4}{2}} = 1. \quad (3.17)$$

Нахождение и построение модели зависимости  $C = f(\alpha, P)$  не представляет практического значения, так как в случае применения газа другого состава данная модель будет неадекватна. Достаточным будет представить зависимость  $C = f(\alpha, P)$  в виде графиков для каждого из значений  $P$  и дать их анализ.

Составим таблицу варьирования факторов для функции  $t = f(\alpha, P)$  (табл. 3.7) и матрицу планирования эксперимента (табл. 3.8).

Таблица 3.7

Таблица варьирования факторов

Факторы	В натурном масштабе		В безразмерном масштабе	
	$X_1$	$X_2$ , кПа	$X_1$	$X_2$
Верхний уровень ( $X_{1+}$ )	2,0	3,6	+1	+1
Нижний уровень ( $X_{1-}$ )	1,0	1,8	-1	-1
Нулевой уровень ( $n_0$ )	1,5	2,7	0	0
Звездная точка ( $+\alpha$ )	2,0	3,6	+1	+1
Звездная точка ( $-\alpha$ )	1,0	1,8	-1	-1

Как видно из табл. 3.7, фактор  $X_1$  варьируется на трех уровнях. По условиям эксперимента необходимо одновременно фиксировать значения двух функций цели. Предварительно проведенными опытами установлено, что для получения объективной картины по зависимости  $C = f(\alpha, P)$  необходимо варьировать фактор  $X_1$  на шести уровнях. Таким образом, композиционный план не подходит для проведения эксперимента.

При однофакторном эксперименте при варьировании первого фактора на всех уровнях для каждого постоянного значения второго общее количество измерений составит  $N = 6 \times 4 = 24$  при одновременном измерении значений двух функций цели (табл. 3.9).

Таблица 3.8

## Матрица планирования

№ опыта	В натурном масштабе		В безразмерном масштабе		Выходные параметры	
	$X_1$	$X_2$ , кПа	$X_1$	$X_2$	$Y^I$	$Y^{II}$
1	1,0	1,8	-1	-1	$Y^I_1$	$Y^{II}_1$
2	2,0	1,8	+1	-1	$Y^I_2$	$Y^{II}_2$
3	1,0	3,6	-1	+1	$Y^I_3$	$Y^{II}_3$
4	2,0	3,6	+1	+1	$Y^I_4$	$Y^{II}_4$
5	1,5	2,7	0	0	$Y^I_5$	$Y^{II}_5$
6	2,0	2,7	+1	0	$Y^I_6$	$Y^{II}_6$
7	1,0	2,7	-1	0	$Y^I_7$	$Y^{II}_7$
8	1,5	3,6	0	+1	$Y^I_8$	$Y^{II}_8$
9	1,5	1,8	0	-1	$Y^I_9$	$Y^{II}_9$

Таблица 3.9

## Таблица условий опытов

Номера опытов	$X_1$	$X_2$	$Y^I$	$Y^{II}$
1	1,0	1,8	$Y^I_1$	$Y^{II}_1$
2	1,2	1,8	$Y^I_2$	$Y^{II}_2$
3	1,4	1,8	$Y^I_3$	$Y^{II}_3$
4	1,6	1,8	$Y^I_4$	$Y^{II}_4$
5	1,8	1,8	$Y^I_5$	$Y^{II}_5$
6	2,0	1,8	$Y^I_6$	$Y^{II}_6$
7	1,0	2,4	$Y^I_7$	$Y^{II}_7$
8	1,2	2,4	$Y^I_8$	$Y^{II}_8$
9	1,4	2,4	$Y^I_9$	$Y^{II}_9$
10	1,6	2,4	$Y^I_{10}$	$Y^{II}_{10}$
11	1,8	2,4	$Y^I_{11}$	$Y^{II}_{11}$
12	2,0	2,4	$Y^I_{12}$	$Y^{II}_{12}$
13	1,0	3,0	$Y^I_{13}$	$Y^{II}_{13}$
14	1,2	3,0	$Y^I_{14}$	$Y^{II}_{14}$
15	1,4	3,0	$Y^I_{15}$	$Y^{II}_{15}$
16	1,6	3,0	$Y^I_{16}$	$Y^{II}_{16}$



Номера опытов	$X_1$	$X_2$	$Y^I$	$Y^{II}$
17	1,8	3,0	$Y^I_{17}$	$Y^{II}_{17}$
18	2,0	3,0	$Y^I_{18}$	$Y^{II}_{18}$
19	1,0	3,6	$Y^I_{19}$	$Y^{II}_{19}$
20	1,2	3,6	$Y^I_{20}$	$Y^{II}_{20}$
21	1,4	3,6	$Y^I_{21}$	$Y^{II}_{21}$
22	1,6	3,6	$Y^I_{22}$	$Y^{II}_{22}$
23	1,8	3,6	$Y^I_{23}$	$Y^{II}_{23}$
24	2,0	3,6	$Y^I_{24}$	$Y^{II}_{24}$

*Примечание.*  $X_1 = \alpha$ ;  $X_2 = P$ ;  $Y^I = t$ ;  $Y^{II} = C$ .

Для сокращения числа опытов (при двухфакторном эксперименте  $N = 36$ ) целесообразно перейти к однофакторному эксперименту ( $N = 24$ ) и применить принцип разделения переменных, а зависимость  $C = f(\alpha, P)$  представить в виде графиков для каждого из значений  $P$  и дать их анализ. Таким образом, результат однофакторного эксперимента будет описываться регрессионной моделью зависимости  $t = f(\alpha)$ . Результатом эксперимента будет семейство кривых  $t_i = f(\alpha)$  при  $P_i = \text{const}$ .

Математическая обработка результатов эксперимента будет включать:

- 1) построение экспериментальных корреляционных (регрессионных) зависимостей с учетом ошибки измерений;
- 2) получение теоретических регрессионных зависимостей;
- 3) аппроксимацию парной регрессии до элементарной функции;
- 4) нахождение коэффициента корреляции полученной функции;
- 5) оценку адекватности полученной модели по критерию Фишера.

#### *Оценка погрешности измерений*

В процессе проведения измерений могут иметь место промахи (грубые ошибки), систематические и случайные ошибки. Промах вызван резким нарушением условий измерения при отдельных наблюдениях. Систематической ошибкой называют составляющую погрешности измерений, остающуюся постоянной и закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины. Систематические ошибки зависят от технического уровня

измерительной аппаратуры и техники эксперимента. Случайной называют составляющую погрешности измерений, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные ошибки обусловлены влиянием большого количества факторов. Их появление неодинаково и случайно от измерения к измерению и не может быть предварительно учтено из-за их зависимости от изменения условий измерений и изменчивости самих измеряемых величин. Если случайная погрешность, полученная из данных измерений, окажется значительно меньше погрешности, определяемой точностью прибора, то нет смысла пытаться еще уменьшить величину случайной погрешности – все равно результаты измерений не станут от этого точнее. Наоборот, если случайная погрешность больше приборной (систематической), то измерение следует провести несколько раз, чтобы уменьшить значение погрешности для данной серии измерений и сделать эту погрешность меньше или одного порядка с погрешностью прибора.

Систематические погрешности приборов, используемых для проведения замеров, приведены в подразделе 3.3. Рассмотрим источники случайных ошибок по опытам:

#### *Замер параметров ГИИ*

1. Жидкостный манометр ( $\pm 1$  мм вод. ст.) – при замере давления газа.
2. Газоанализаторы – при замере состава пробы.
3. Контактный термометр – при замере температуры излучателя.

#### *Конструктивный расчет*

1. Штангенциркуль ( $\pm 0,05$  мм) – при замере конструктивных характеристик горелок.

#### *Тарировка расхода газа*

1. Термометр ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) – при замере температуры газа.
2. Барометр ( $\pm 1$  мм рт. ст.) – при замере атмосферного давления.
3. Счетчик газа – при замере расхода газа.
4. Секундомер механический ( $\pm 0,2$  с) – при измерении времени.

Для расчета абсолютной ошибки при малом количестве измерений вводится специальный коэффициент, зависящий от надежности  $P$  и числа измерений  $n$ , называемый коэффициентом Стьюдента  $t$ . Предварительно проведенные опыты показали, что при числе замеров  $n = 4$  – при замере параметров ГИИ и  $n = 3$  – при

замере конструктивных характеристик ГИИ и тарировке расхода газа величина погрешности результата измерения  $\Delta x$  меньше величины погрешности прибора  $\delta$  в три раза. Таким образом, можно утверждать, что при данном числе замеров величина погрешности результатов измерений  $\Delta x$  с надежностью  $P = 0,95$  будет определяться только величиной погрешности прибора  $\delta$ .

### 3.5. Результаты работы горелок на газе низкого давления

Исследования работы горелок проводились на стенде, описанном в подразделе 3.1, по методике, изложенной в подразделе 3.2. В первую очередь исследовалась работа горелок на газе низкого давления без изменения конструктивных параметров. Были получены исходные (базовые) показатели: температура излучающей поверхности горелок и состав продуктов сгорания при различных давлениях газа и оптимальной величине коэффициента избытка воздуха. В качестве топлива использовался сжиженный углеводородный газ (СУГ). Состав газа представлен в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Результаты хроматографического анализа СУГ

Организация, выполнившая анализ	Содержание компонен- тов, %			Плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	Низшая теплота сгорания, МДж/дм <sup>3</sup>
	Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Изобутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		
ОАО «КуйбышевАзот»	2,09	69,6	28,31	2,19	98,2

Предварительные опыты показали, что горелки наилучшим образом работают в горизонтальном положении (излучателем вверх), угол наклона излучающей насадки по отношению к горизонту  $\beta = 0^\circ$ , то есть при данном положении коэффициент избытка воздуха имеет оптимальную величину  $\alpha = 1,05$ . Если уменьшать угол установки горелки, значение  $\alpha$  уменьшится и достигнет при  $\beta = 180^\circ$  величины 0,7 (подраздел 2.4). Полученные данные при горизонтальном положении горелок представлены в табл. 3.11 и 3.12. По данным таблиц построены зависимости, изображённые на рис. 3.3–3.6.

Из рис. 3.3 и 3.4 видно, что с увеличением давления газа температура излучающей поверхности растёт от  $730^{\circ}\text{C}$  при  $P = 1800 \text{ Па}$  до  $845^{\circ}\text{C}$  при  $P = 3600 \text{ Па}$  для обеих исследованных горелок.

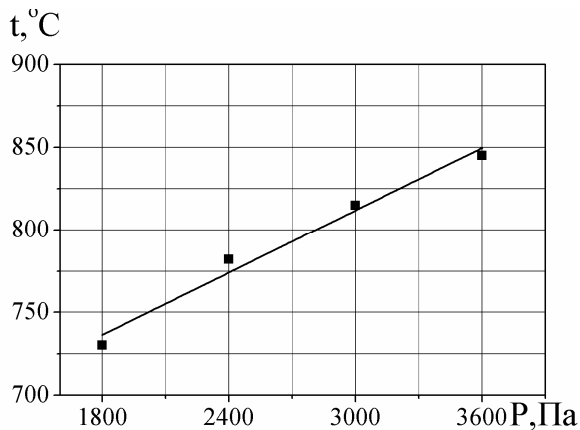


Рис. 3.3. Зависимость пирометрической температуры излучающей поверхности горелки ГИИ-1,85 от давления газа при  $\alpha = 1,05$

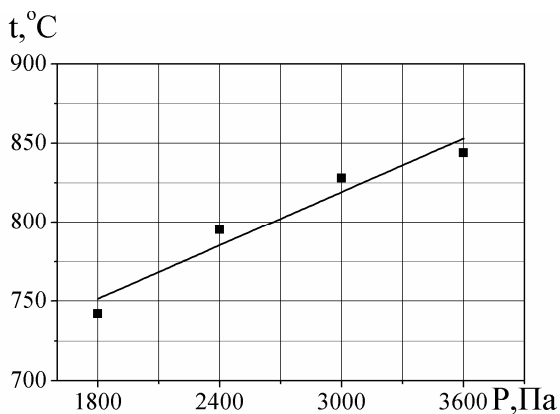


Рис. 3.4. Зависимость пирометрической температуры излучающей поверхности горелки ГИИВ-3,65 от давления газа при  $\alpha = 1,05$

Таблица 3.11

## Базовые показатели ГИИ-1,85

Давление газа перед горелкой, Па	Содержание веществ в сухих неразбавленных продуктах сгорания				Температура излучающей поверхности при $\alpha = 1,05, ^\circ\text{C}$
	СН, %	СО, %	NO, мг/м <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	
1	2	3	4	5	6
1800	0,007	0,046	1,69	1,69	730
2400	0	0,021	3,47	1,65	782
<b>3000</b>	<b>0</b>	<b>0,014</b>	<b>4,65</b>	<b>0,93</b>	<b>815</b>
3600	0	0,010	6,26	0,63	845

Таблица 3.12

## Базовые показатели ГИИВ-3,65

Давление газа перед горелкой, Па	Содержание веществ в сухих неразбавленных продуктах сгорания				Температура излучающей поверхности при $\alpha = 1,05, ^\circ\text{C}$
	СН, %	СО, %	NO, мг/м <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	
1	2	3	4	5	6
1800	0,005	0,051	2,75	1,69	742
2400	0,002	0,024	4,31	1,89	795
<b>3000</b>	<b>0</b>	<b>0,016</b>	<b>5,73</b>	<b>1,16</b>	<b>828</b>
3600	0	0,010	6,67	0,84	844

Концентрация СО (рис. 3.5 и 3.6) в продуктах сгорания уменьшается при увеличении давления газа и составляет при номинальном давлении газа (3000 Па) 0,014% для ГИИ-1,85 и 0,016% для ГИИВ-3,65.

Содержание NO возрастает при увеличении давления газа пропорционально температуре излучающей поверхности горелки. Для номинального давления газа выход NO для обеих горелок составил 5–6 мг/м<sup>3</sup>. Выход NO<sub>2</sub> незначителен и имеет обратную зависимость.

Наличие углеводов (СН) в продуктах сгорания при давлении газа меньше номинального обусловлено снижением эжектирующей способности струи газа.

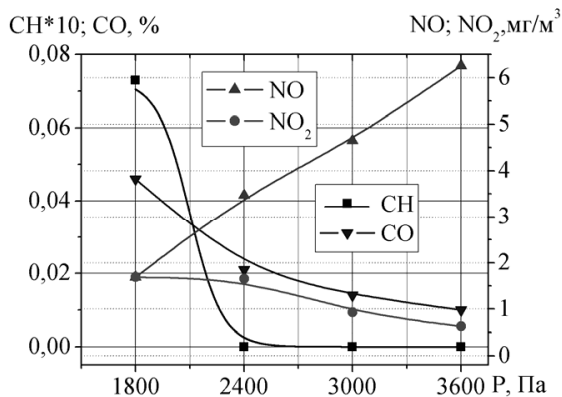


Рис. 3.5. Зависимость состава продуктов сгорания горелки ГИИ-1,85 от давления газа при  $\alpha = 1$

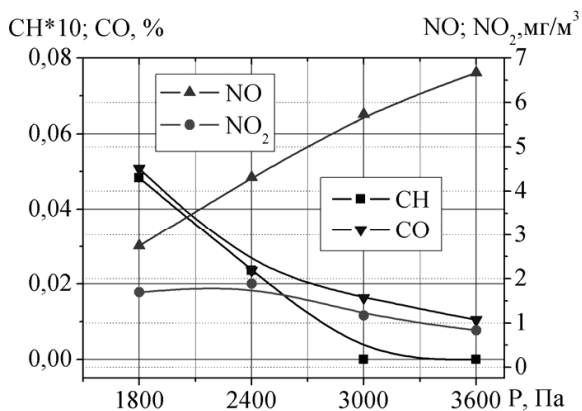


Рис. 3.6. Зависимость состава продуктов сгорания горелки ГИИВ-3,65 от давления газа при  $\alpha = 1$

Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые горелки по составу продуктов сгорания и температуре излучающей поверхности соответствуют требованиям ГОСТ 25696-83\* «Горелки газовые инфракрасного излучения».

В последующих сериях опытов излучатель горелок закрыли прозрачным экраном из термостойкого стекла с отверстием в центре для отвода продуктов сгорания. Опытным путем установлено,

что экран задерживает (поглощает и отражает) 18% инфракрасного излучения горелок. Экран предотвращает доступ окружающего воздуха в зону горения. Для подачи избыточного объёма воздуха горелку ГИИ-1,85 оснастили вентилятором (рис. 3.7).

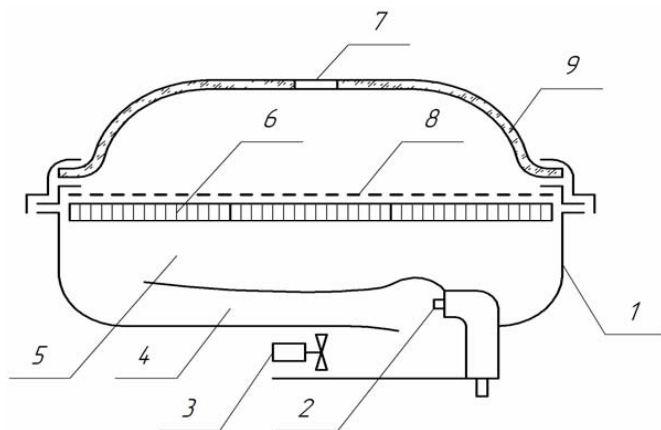


Рис. 3.7. Схема исследованной горелки: 1 – корпус; 2 – сопло; 3 – вентилятор; 4 – эжектор; 5 – распределительная камера; 6 – керамические плитки; 7 – отверстие; 8 – металлическая сетка; 9 – экран

Горелка ГИИ-1,85 устанавливалась в трех пространственных положениях:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $180^\circ$  к поверхности пола, то есть излучающая поверхность направлена, соответственно, вверх, вниз под углом  $45^\circ$ , вниз. Результаты работы горелки с принудительной подачей воздуха для горения показали слабую зависимость температуры излучателя и состава продуктов сгорания от пространственного положения горелки. Это объясняется отсутствием в данном случае влияния на коэффициент  $\alpha$  тяги, образующейся по высоте огневых каналов керамических плиток излучателя. При работе горелки без принудительной подачи воздуха по мере уменьшения угла установки в каналах возникает тяга, которая создает разрежение в смесительной камере (см. подраздел 2.4). В результате проведенных исследований для трех пространственных положений горелки

получены усредненные данные, по которым построены зависимости, изображённые на рис. 3.8 и 3.9.

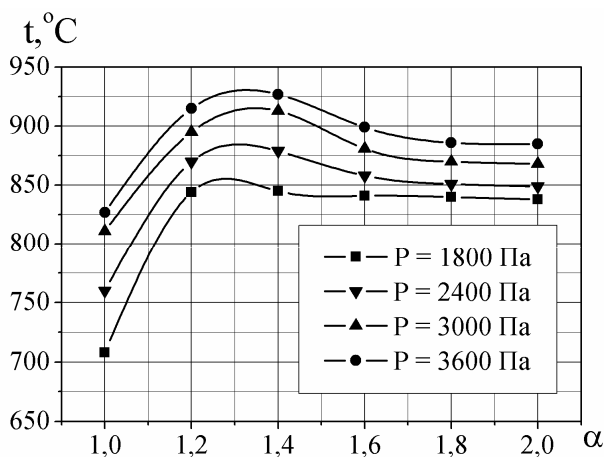


Рис. 3.8. Зависимость температуры излучающей поверхности горелки ГИИ-1,85 от коэффициента  $\alpha$  и давления газа

Из рис. 3.8 видно, что с увеличением коэффициента  $\alpha$  температура излучающей поверхности растет и достигает максимума — 845–927°C для ГИИ-1,85 при  $\alpha = 1,3–1,4$ . Затем она снижается при всех исследованных величинах давления газа. С увеличением давления газа, следовательно, расхода газа и мощности горелки температура излучающей поверхности растет от 708°C при  $P = 1800$  Па до 927°C при  $P = 3600$  Па.

По графикам зависимостей рис. 3.9 можно отметить, что с увеличением коэффициента  $\alpha$  до 1,4 концентрация CO и углеводородов CH в продуктах сгорания падает. Затем при  $\alpha > 1,4$  концентрации CO и CH остаются на минимальном уровне и составляют соответственно 0,01–0,022% и 0,001–0,002%. Максимальный выход оксида азота — 6–10 мг/м<sup>3</sup> — зафиксирован при  $\alpha = 1,2–1,4$ . Эти результаты соответствуют теоретическим представлениям об образовании NO при сжигании топлива. Выход диоксида азота незначителен и составляет 1–2 мг/м<sup>3</sup>.



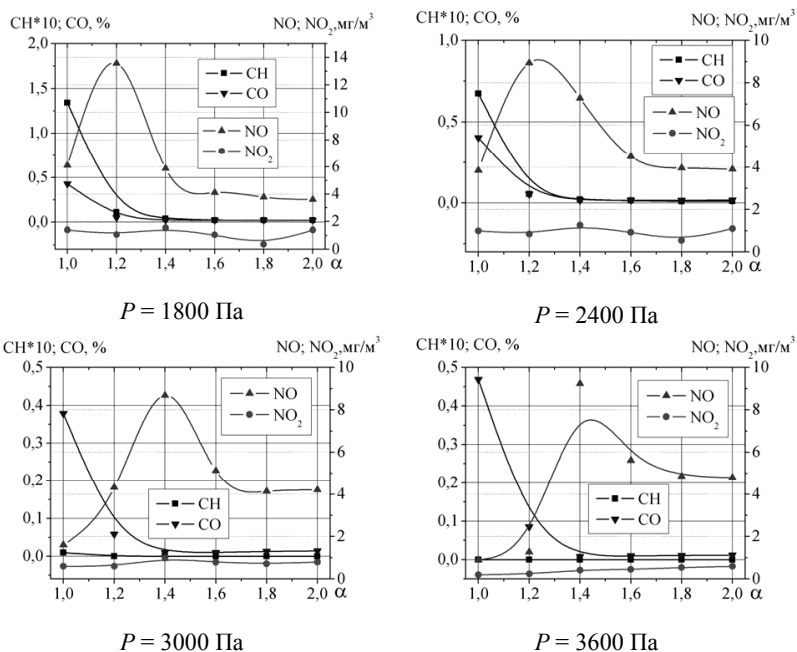


Рис. 3.9. Зависимость состава продуктов сгорания горелки ГИИ-1,85 от коэффициента  $\alpha$  при различных величинах давления газа

### 3.6. Результаты конструктивного расчёта

Для исследования работы горелок на бедных газоздушных смесях при среднем давлении газа проведен конструктивный расчёт, в результате которого определен диаметр сопла.

Конструктивные параметры ГИИ-1,85

СУГ (пропан, бутан)

- сопло  $d_c = 0,8 \text{ мм}$ ,  $F_c = 0,005 \text{ см}^2$ ,  $\mu_c = 0,8$ ;
- горловина  $d_r = 16 \text{ мм}$ ,  $F_r = 2,01 \text{ см}^2$ ;
- основной параметр эжектора  $F = F_r / F_c = 402$  (400);
- расход газа при 2940 Па –  $0,07 \pm 15\% \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Конструктивные параметры ГИИВ-3,65

СУГ (пропан, бутан)

- сопло  $d_c = 1,05 \text{ мм}$ ,  $F_c = 0,00865 \text{ см}^2$ ,  $\mu_c = 0,8$ ;
- горловина  $d_r = 21 \text{ мм}$ ,  $F_r = 3,462 \text{ см}^2$ ;

- основной параметр эжектора  $F = F_r / F_c = 400 \pm 5$ ;
- расход газа при 2940 Па –  $0,138 \pm 15\% \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Результаты конструктивного расчёта горелок, выполненного по методике, изложенной в подразделе 3.2, свидетельствуют о том, что установка сопла диаметром  $d = 0,5 \text{ мм}$  позволяет добиться работы горелок на бедных газоздушных смесях без применения системы принудительной подачи воздуха, а изменяя площадь сечения горловины эжектора, можно изучить работу горелки при различных коэффициентах избытка воздуха.

Конструктивный расчет выявил зависимость коэффициента избытка воздуха от суммарной площади отверстий керамической матрицы. В случае установки над горелкой прозрачного экрана с отверстием для отвода продуктов сгорания, площадь которого меньше суммарной площади сечения отверстий излучателя ( $F_{\text{отв}} < F_o$ ), необходимо учитывать его гидравлическое сопротивление. Расчетные зависимости коэффициента  $\alpha$  от величины диаметра отверстия в экране  $d_{o,3}$  для горелок, оснащенных стандартным соплом, получены по формуле (3.5) ( $F_o = F_{\text{отв}}$ ) и показаны на рис. 3.10.

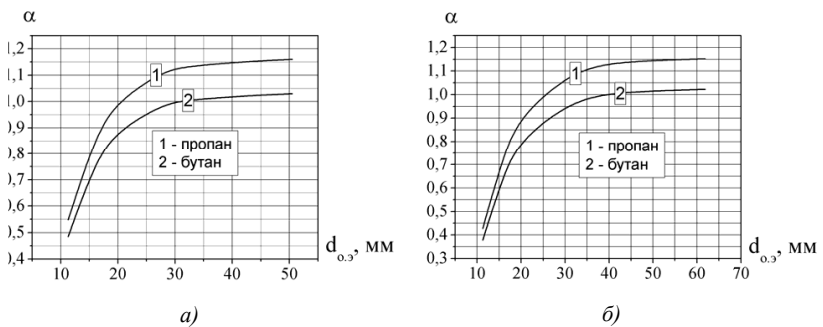


Рис. 3.10. Зависимость коэффициента избытка воздуха от диаметра отверстия в прозрачном экране: а – для ГИИ-1,85; б – для ГИИВ-3,65

Из рис. 3.10 видно, что при установке прозрачного экрана над горелкой с отверстием для отвода продуктов сгорания диаметром  $d_{o,3} < 30 \text{ мм}$  для ГИИ-1,85 и  $d_{o,3} < 40 \text{ мм}$  для ГИИВ-3,65 гидравлическое сопротивление будет велико настолько, что конструкция эжектора не позволит приготовить смесь стехиометрического состава.

### 3.7. Результаты тарировки расхода газа

При исследовании работы горелок на газе низкого давления расход газа фиксировался по счётчику и приводился к нормальным условиям.

В опытах с газом среднего давления нельзя использовать счётчик, поэтому выполнена тарировка расхода газа в зависимости от величины давления газа и диаметра сопла. По экспериментальным и полученным в ходе расчетов данным построены зависимости, представленные на рис. 3.11 и 3.12.

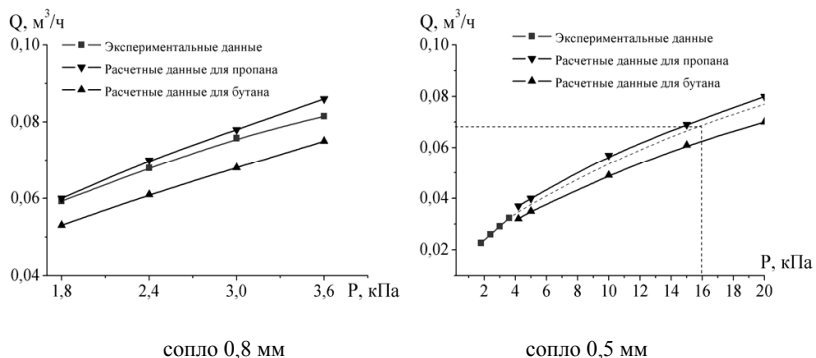


Рис. 3.11. Зависимость расхода газа от давления для ГИИ-1,85

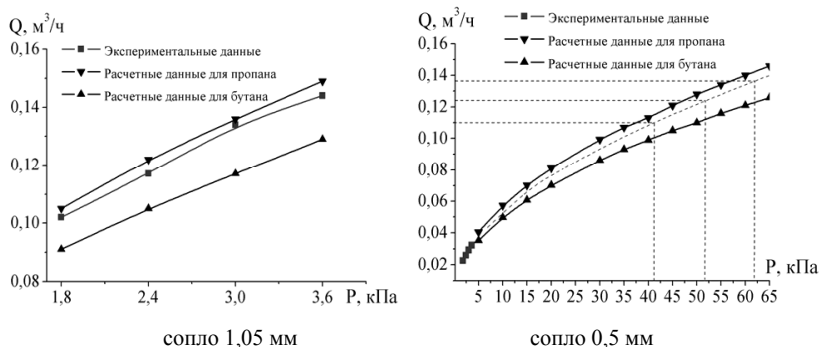


Рис. 3.12. Зависимость расхода газа от давления для ГИИВ-3,65

Из рис. 3.11 и 3.12 видно, что сжиженный газ, применяемый для проведения опытов, характеризуется большим содержанием пропана.

Графики рис. 3.11 наглядно показывают, что для сопла 0,5 мм номинальная мощность горелки ГИИ-1,85, соответствующая расходу газа 0,07 м<sup>3</sup>/ч, обеспечивается при давлении газа 16 кПа. Для ГИИВ-3,65 (рис. 3.12) при установке сопла 0,5 мм расход газа 0,110, 0,124, 0,137 м<sup>3</sup>/ч обеспечивается при давлении газа соответственно 43, 53, 63 кПа.

### 3.8. Результаты работы горелок на газе среднего давления

Горелки ГИИ-1,85 и ГИИВ-3,65 были оснащены прозрачным экраном с отверстием для отвода продуктов сгорания диаметром соответственно 21 и 23 мм. Без изменений в конструкции эжектора горелок при работе на газе низкого давления процесс горения протекал с явными признаками недостатка воздуха – пламя отрывалось, наблюдалось нестабильное, волнообразное горение на поверхности обеих горелок. Это свидетельствует о подтверждении теоретической зависимости, представленной на рис. 3.10.

Для изучения работы горелки ГИИ-1,85 на газе среднего давления без системы принудительной подачи воздуха для горения было установлено сопло диаметром 0,5 мм. Величина коэффициента избытка воздуха изменялась в пределах  $\alpha = 1,7-1,01$  путём увеличения гидравлического сопротивления эжектора. Для этого использовались цилиндрические вставки (рис. 3.13) внутренним диаметром  $d = 9-13,4$  мм.

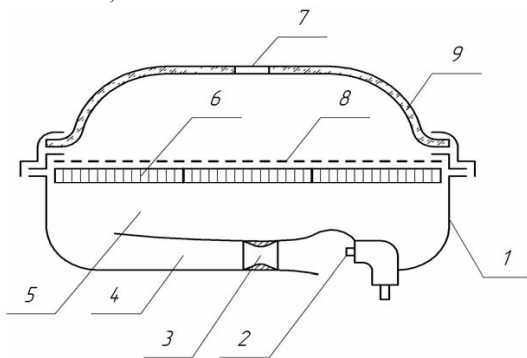


Рис. 3.13. Конструкция горелки со вставкой в эжекторе: 1 – горелка; 2 – сопло; 3 – вставка; 4 – эжектор; 5 – камера смешения; 6 – излучатель; 7 – отверстие; 8 – сетка; 9 – прозрачный экран

Опыты проводились при давлении газа 16 кПа, которое соответствует номинальной мощности горелки (см. подраздел 3.7). В процессе изменения внутреннего диаметра вставок, сужающих горловину эжектора, регистрировалась величина коэффициента избытка воздуха.

В результате проведённых опытов были получены следующие данные, представленные в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Опытные данные

Давление газа, кПа	Диаметр вставки, мм	Экспериментальное значение коэффициента $\alpha$	Расчетное значение коэффициента $\alpha$	
			для пропана	для бутана
16	9,0	1,01	1,03	0,91
	10,8	1,14	1,24	1,10
	12,0	1,2	1,38	1,23
	12,3	1,33	1,42	1,26
	13,4	1,41	1,55	1,38
	без вставки	1,7	1,86	1,65

Полученные данные свидетельствуют о том, что установка сопла диаметром  $d = 0,5$  мм позволяет добиться работы горелки ГИИ-1,85 на бедных газозвушных смесях без применения системы принудительной подачи воздуха. Изменяя площадь сечения (диаметр) горловины эжектора путем установки вставки различного внутреннего диаметра, можно изучить работу горелки при различных коэффициентах избытка воздуха. Полученные экспериментальные результаты хорошо совпадают с расчетными данными.

Для изучения работы горелки ГИИВ-3,65 на газе среднего давления вместо сопла диаметром 1,05 мм установили сопло диаметром 0,5 мм. Для сопла выполнили ниппель-удлинитель, на резьбе которого установили регулятор расхода воздуха. Величина коэффициента избытка воздуха изменялась в пределах  $\alpha = 1,0-2,0$  путём перемещения регулятора расхода воздуха. Благодаря этому удалось обеспечить работу горелки на газе среднего давления и более точно регулировать (задавать) расход воздуха, то есть получать необходимые значения коэффициента  $\alpha$ .

Опыты проводились при давлении газа 43, 53 и 63 кПа. Величина коэффициента избытка воздуха изменялась в пределах  $\alpha = 1,0-2,0$ . В процессе изменения параметра  $\alpha$  регистрировались температура излучающей поверхности горелки и состав продуктов сгорания.

В результате проведённых опытов получены данные, по которым построены зависимости, изображённые на рис. 3.14 и 3.15.

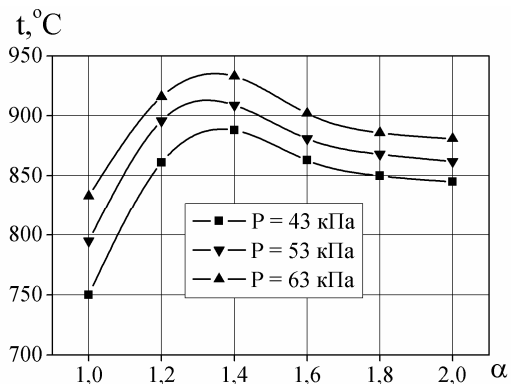


Рис. 3.14. Зависимость температуры излучающей поверхности горелки ГИИ-1,85 от коэффициента  $\alpha$  и давления газа

Из рис. 3.14 видно, что максимальная пирометрическая температура излучателя и, следовательно, излучательная способность горелки наблюдается при  $\alpha = 1,4$  при всех значениях давления газа. С увеличением давления газа, т. е. расхода газа и мощности горелки, температура излучателя возрастает от  $750^\circ\text{C}$  при  $P = 43$  кПа до  $933^\circ\text{C}$  при  $P = 63$  кПа.

По рис. 3.15 хорошо видно, как уменьшается концентрация СО в продуктах сгорания, достигая минимальных значений при  $\alpha > 1,4$ .

Концентрация NO (рис. 3.15) с увеличением  $\alpha$  возрастает и достигает максимума при  $\alpha = 1,4$ , а затем снижается при всех исследованных давлениях. Возрастает концентрация NO и с увеличением давления газа. Максимальная концентрация NO ( $10-11$  мг/м<sup>3</sup>) получена при  $P = 63$  кПа и  $\alpha = 1,4$ . Эти результаты соответствуют теоретическим представлениям об образовании NO при сжигании топлива.

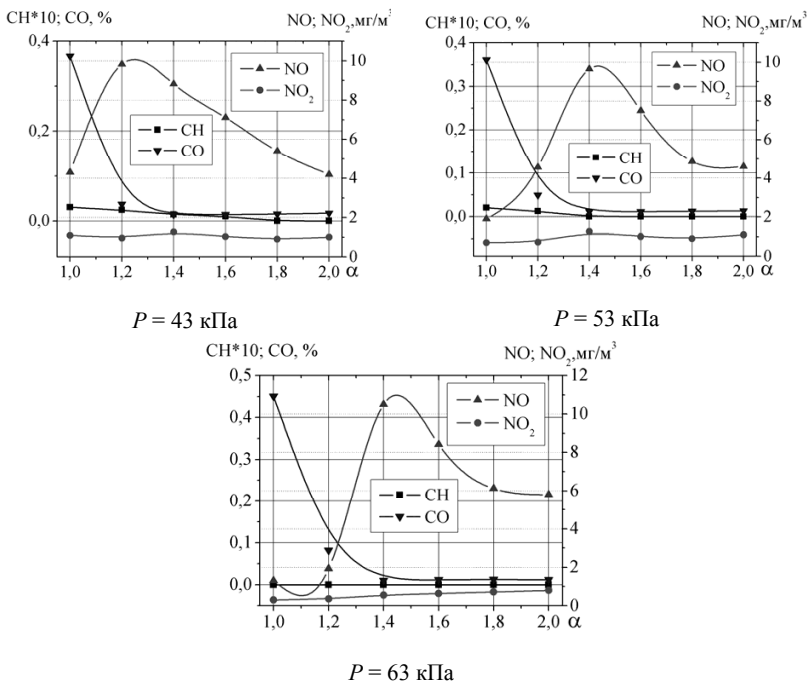


Рис. 3.15. Зависимость состава продуктов сгорания горелки ГИИВ-3,65 от коэффициента  $\alpha$  и давления газа

Из рис. 3.15 следует, что при сжигании газозудушной смеси образуется незначительное количество углеводородов, в пределах 0,001–0,003%. Выход диоксида азота также незначителен и составляет 1–2  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

В процессе проведения опытов проскок пламени не наблюдался.

### 3.9. Сравнительный анализ результатов исследований

В результате исследований получены следующие зависимости, которые можно сравнить с базовыми показателями горелок. На рис. 3.16 показана зависимость пирометрической температуры излучающей поверхности горелок ГИИ-1,85 и ГИИВ-3,65 от мощности в сравнении с базовыми показателями.

Зависимости, представленные на рис. 3.16, имеют аналогичный вид. Эти зависимости наглядно показывают, что температура

излучателя горелок во всем исследованном диапазоне мощностей при установке прозрачного экрана и при значении коэффициента  $\alpha = 1,4$  увеличивается в среднем на 90–100°С по сравнению с базовыми показателями горелок.

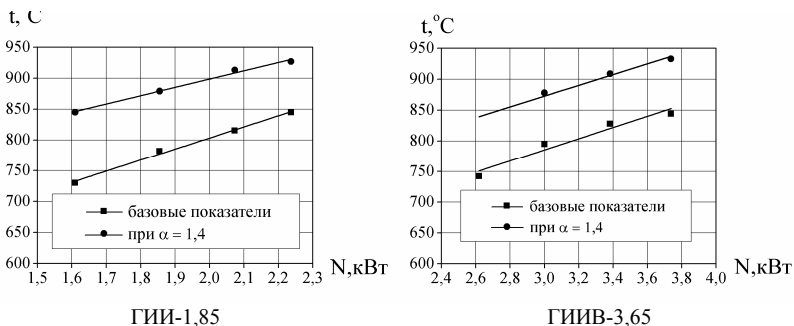


Рис. 3.16. Зависимость пирометрической температуры от мощности

Используя разработанную модель тепловых потоков ГИИ, приведенную в подразделе 2.5, и экспериментальные данные можно рассчитать изменение теоретического КПД горелок, оснащенных и не оснащенных прозрачным экраном. Согласно закону Стефана – Больцмана, с учетом задержки части излучения экраном в размере 18% от общего количества излучения (см. подраздел 3.5) и с учетом снижения температуры горения газовоздушной смеси с 2100°С при  $\alpha = 1,05$  до 1650°С при  $\alpha = 1,4$  (см. рис. 2.3), значение теоретического КПД горелок (см. подраздел 2.2) по сравнению с базовыми показателями можно рассчитать, как показано в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Расчет теоретического лучистого КПД горелок

Показатель	Базовые показатели горелки	Горелка с экраном при $\alpha = 1,4$
Температура излучателя, °С	815	913
Теоретическая температура горения газа, °С	2100	1650
Теоретическая доля прямой отдачи теплоты излучением $\eta_{\text{рад,теор}}$ (по формуле (2.2))	0,61	0,45



Показатель	Базовые показатели горелки	Горелка с экраном при $\alpha = 1,4$
Процент задержки части излучения прозрачным экраном, %	–	18
Увеличение абсолютного количества теплоты, излучаемой керамической поверхностью, $Q_{изл}$ , % (по формуле (2.1))	–	$57,5 - 18 = 39,5$
Теоретически возможный процент отдачи теплоты излучением, %	61	45
Если принять теоретически возможный процент отдачи теплоты излучением за 100%	100	73,8
С учетом увеличения абсолютного количества теплоты, излучаемой керамической поверхностью, $Q_{изл}$ , %	100	$73,8 + 39,5 = 113,3$
Разница между теоретически возможным процентом отдачи теплоты излучением, %	$113,3 - 100 = 13,3$	

Как видно из табл. 3.14, доля прямой отдачи теплоты излучением снизилась по сравнению с базовыми показателями с 0,61 до 0,45, но при этом согласно закону Стефана – Больцмана увеличилось на 39,5% абсолютное количество теплоты, излучаемой горелкой. Если взять теоретически возможный процент отдачи теплоты базовой горелки – 60% за 100%, то для горелки с экраном этот показатель будет равен 73,8%. С учетом увеличения абсолютного количества теплоты, излучаемой горелкой во втором случае, на 39,5% разница между базовыми и экспериментальными данными составит 13%. Это позволяет утверждать, что абсолютное количество теплоты, излучаемой горелкой во втором случае, а значит и лучистый КПД, увеличивается на 13%.

В табл. 3.15 приведено сравнение санитарно-гигиенических показателей исследуемых горелок инфракрасного излучения.

Как видно из табл. 3.15, содержание оксида углерода в продуктах сгорания горелок с экраном снизилось в среднем на 50–60 мг/м<sup>3</sup> (25–30%). Это объясняется увеличением концентрации радикала ОН в продуктах сгорания из-за увеличения объема воздуха, поступающего для горения. Вследствие этого интенсифицировалась реакция СО с гидроксидом ( $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ ), что способствует более интенсивному выгоранию оксида углерода (подраздел 2.7).

Сравнение показателей горелок при номинальном давлении газа

Показатель	Базовые показатели горелки		Горелка с экраном при $\alpha = 1,4$	
	ГИИ-1,85	ГИИВ-3,65	ГИИ-1,85	ГИИВ-3,65
Выход CO, мг/м <sup>3</sup>	175	200	125	138
Выход NO, мг/м <sup>3</sup>	5	5	9	10
Выход NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	1	1	1	1
Выход NO <sub>x</sub> в пересчете на NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>	9	9	15	17

А.К. Родиным для ГИИ, имеющих вторичный излучатель в виде нихромовой сетки, в пределах температур первичного излучателя от 527 до 1027°С при  $\alpha = 1,05$  предложена следующая зависимость выхода NO<sub>x</sub> от температуры излучающей насадки:

$$C_{NO_x} = 0,16 \cdot 10^{0,00173 T}, \text{ мг/м}^3. \quad (3.18)$$

На рис. 3.17 представлены графики зависимости выхода оксидов азота от температуры излучающей насадки и коэффициента  $\alpha$ , полученные экспериментально и по формуле (3.18). Как видно из рис. 3.17, характер экспериментальной и расчетной зависимостей аналогичен. Разница в численных значениях обусловлена тем, что зависимость по формуле (3.18) была получена А.К. Родиным путем усреднения показателей нескольких горелок.

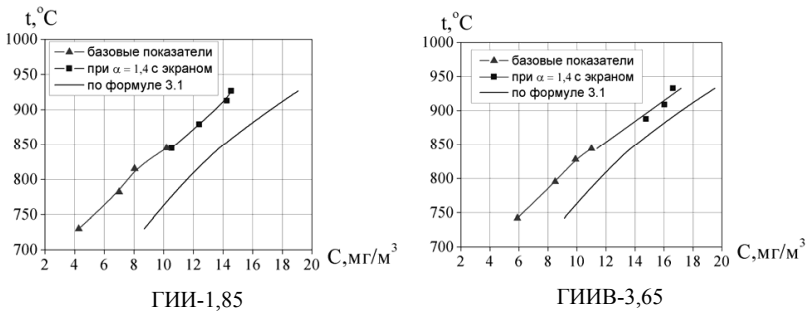


Рис. 3.17. Зависимость выхода NO<sub>x</sub> от температуры излучающей насадки и коэффициента  $\alpha$

Зависимости, представленные на рис. 3.17, показывают, что выход оксидов азота горелок, работающих на газозвоздушной смеси с  $\alpha = 1,05$ , ниже, чем тех же горелок, оснащенных прозрачным экраном, работающих на обедненной газозвоздушной смеси с  $\alpha = 1,4$ . Концентрация оксидов азота в продуктах сгорания возросла, так как увеличилась температура излучателя, но при этом горелки, оснащенные экраном, обладают по сравнению с заводскими горелками повышенным на 18% КПД и возможностью централизованного отвода продуктов сгорания. Эти результаты соответствуют теоретическим представлениям об образовании  $\text{NO}_x$  при сжигании топлива. Следует отметить, что выход оксидов азота не превышает концентрации, нормируемой ГОСТ 25696-83\*.

В результате математической обработки экспериментальных зависимостей температуры излучателя от коэффициента  $\alpha$  (рис. 3.8 и 3.17) с помощью программы OriginPro 8 проведена аппроксимация и для номинальной мощности горелок получена формула, позволяющая с высокой точностью (коэффициент корреляции полученной функции – 0,99) вычислять значение температуры излучателя при известной величине коэффициента избытка воздуха:

$$t = -2318,7 + 6457,5\alpha - 434,8\alpha^2 + 906,2\alpha^3, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.19)$$

В табл. 3.16 показано сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры излучающей поверхности исследуемых ГИИ в зависимости от коэффициента  $\alpha$  при номинальной мощности.

Таблица 3.16

Температура излучающей поверхности ГИИ

Коэффициент $\alpha$	Температура излучателя, $^\circ\text{C}$		
	Опытные значения		Расчет по формуле (3.19)
	ГИИ-1,85	ГИИ-3,65	
1	811	795	810
1,2	895	896	898
1,4	913	909	908
1,6	881	881	884
1,8	870	868	869

Данная формула применима для ГИИ, имеющих вторичный излучатель в виде нихромовой сетки, оснащенных прозрачным экраном с отверстием для отвода продуктов сгорания, в интервале  $\alpha = 1-1,8$  и номинальной мощности горелки. Приведенную формулу можно применять и при мощности горелки отличной от номинальной, но тогда на каждые 100 Вт тепловой мощности горелки следует вводить поправку к температуре излучателя  $\Delta t$ , которая составляет 9–12°C. Если температура излучателя вычисляется при мощности горелки меньше номинальной, то поправка  $\Delta t$  отрицательна, иначе – положительна.

Результаты исследований в точности совпадают с теоретическими представлениями о температуре горения при микрофакельном сжигании газового топлива на поверхности керамического перфорированного излучателя, рассмотренными в подразделе 2.2, а также теоретическим представлениям об образовании основных вредных веществ при сжигании газа в горелках инфракрасного излучения (подраздел 2.7).

### **Выводы по разделу 3**

1. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено увеличение в среднем на 13% КПД инфракрасных горелок с прозрачным экраном, работающих на бедных газозвоздушных смесях.

2. Экспериментально подтверждено, что с увеличением коэффициента избытка воздуха повышается устойчивость пламени инфракрасных горелок по отношению к пробою.

3. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что экран препятствует интенсивным конвективным тепловым потерям, возникающим при обтекании окружающим воздухом излучающей поверхности, вследствие чего температура излучателя возрастает в среднем на 90–100°C по сравнению с показателями горелок без экрана.

4. Экспериментально подтверждена расчетная зависимость коэффициента избытка воздуха от диаметра отверстия в прозрачном экране.

5. Экспериментально установлена возможность улучшения санитарно-гигиенических характеристик горелок инфракрасного

излучения с прозрачным экраном при работе на бедных газоздушных смесях: содержание оксида углерода в продуктах сгорания снизилось в среднем на 25–30%, выход оксида азота составил 15–17 мг/м<sup>3</sup>.

### **Контрольные вопросы к разделу 3**

1. Перечислите основные элементы устройства экспериментального стенда.
2. Как отбирается и анализируется проба продуктов сгорания?
3. Влияние каких факторов исследовалось в эксперименте?
4. Какова цель конструктивного расчета горелки?
5. Что показывает коэффициент массовой эжекции?
6. Как вычисляется коэффициент объемной эжекции?
7. Назовите основной параметр эжектора.
8. Что показывает основной параметр горелки?
9. Какова абсолютная и относительная ошибка приборов, используемых в экспериментальных исследованиях?
10. Какова цель планирования научного эксперимента?
11. В чем заключается рандомизация факторов?
12. Какова функция цели плана эксперимента?
13. В чем заключается процесс отсеивания факторов?
14. Почему нельзя использовать счетчик при работе горелок на газе среднего давления?
15. Как производится тарировка расхода газа?
16. Влияет ли величина отверстия в прозрачном экране на процесс горения?
17. Зачем использовалась вставка в эжектор?
18. При какой величине коэффициента избытка воздуха наблюдается максимальная температура излучающей поверхности?
19. Каков характер зависимости состава продуктов сгорания от коэффициента избытка воздуха?
20. Каков характер зависимости состава продуктов сгорания от давления газа?

## Библиографический список

1. Блох, А.Г. Основы теплообмена излучением / А.Г. Блох. — М. : Госэнергоиздат, 1967. — 331 с.
2. Богомолов, А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А.И. Богомолов, Д.Я. Вигдорчик, М.А. Маевский. — М. : Стройиздат, 1967. — 254 с.
3. Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. — М. : Госэнергоиздат, 1963. — 278 с.
4. Брамсон, М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел / М.А. Брамсон. — М. : Наука, 1964. — 214 с.
5. Брюханов, О.Н. Радиационно-конвективный теплообмен при сжигании газа в перфорированных системах / О.Н. Брюханов. — Л. : Изд-во ЛГУ, 1977. — 240 с.
6. Брюханов, О.Н. Микрофакельное сжигание газов / О.Н. Брюханов. — Л. : Недра, 1983. — 190 с.
7. Брюханов, О.Н. Радиационный газовый нагрев / О.Н. Брюханов, Е.В. Крейнин, Б.С. Мастрюков. — Л. : Недра, 1989. — 160 с.
8. ГОСТ 25696-83\*. Горелки газовые инфракрасного излучения. Общие технические требования и правила приёмки. — М. : Изд-во стандартов, 1984. — 4 с. — (Группа Е25).
9. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. — М. : Мир, 1975. — 934 с.
10. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива / А.С. Иссерлин. — Л. : Недра, 1987. — 336 с.
11. Ионин, А.А. Газоснабжение : учебник / А.А. Ионин. — М. : Стройиздат, 1989. — 439 с.
12. Ициксон, Б.С. Инфракрасные газовые излучатели / Б.С. Ициксон, Ю.А. Денисов. — М. : Недра, 1969. — 280 с.
13. Левин, А.М. Принципы рационального сжигания газа / А.М. Левин. — Л. : Недра, 1977. — 247 с.
14. Равич, М.Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве / М.Б. Равич. — М. : Недра, 1987. — 238 с.
15. Родин, А.К. Применение излучающих горелок для отопления / А.К. Родин. — Л. : Недра, 1976. — 117 с.
16. Родин, А.К. Газовое лучистое отопление / А.К. Родин. — Л. : Недра, 1987. — 190 с.

17. Северинец, Г.Н. Применение газовых горелок инфракрасного излучения для сушки и нагрева / Г.Н. Северинец. – Л. : Недра, 1970. – 128 с.
18. Северинец, Г.Н. Применение газовых излучающих горелок для сушки и нагрева / Г.Н. Северинец. – Л. : Недра, 1980. – 167 с.
19. Сигал, И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И.Я. Сигал. – Л. : Недра, 1988. – 312 с.
20. Харин, В.В. Автоматизация управления газовыми горелками инфракрасного излучения / В.В. Харин. – Л. : Недра, 1989. – 160 с.
21. Ed. Jan F. Kreider Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning // Boca Raton, CRC Press LLC. 2001.

**Перечень патентных документов по инфракрасным горелкам**

№ п/п	Номер патентного документа	Название изобретения Заявитель/ Патенто-обладатель	Автор(ы)	Дата публикации	Примечания
<i>Авторские свидетельства СССР F 23 D 13/12, 13/16; с 1985 года F 23 D 14/12, 14/16</i>					
1	87854	Беспламенная горелка для сжигания газа низкого давления	С.Н. Шорин, К.Н. Правозеров	БИ, № 12, 1950	Керамическая головка снабжена расширяющимися каналами шелеобразной формы
2	99889	Горелка для беспламенного сжигания газа низкого давления	И.А. Недужий, М.С. Брехман	БИ, № 2, 1955	Керамическая многодырчатая насадка чашеобразной формы
3	149846	Газовая горелка инфракрасного излучения	А.М. Левин, И.А. Ценциппер, П.П. Гакинулян	БИ, № 17, 1962	Горелка «Фонарь» в виде полого цилиндра или многогранной призмы
4	177017	Ветроустойчивая газовая горелка. СКБ «Газоприборавтоматика»	И.В. Краснощёков и др.	БИ, № 24, 1965	Снабжена камерой, в рефлекторе выполнены отверстия для забора воздуха в смеситель
5	186068	Излучатель для газовых инфракрасных горелок. СКБ «Газоприборавтоматика»	И.В. Краснощёков, Р.Р. Киббель, Р.Н. Кашин	БИ, № 18, 1966	Излучающая поверхность имеет пирамидальные выступы
6	228844	Газовая радиационная горелка	Р.Н. Кашин	БИ, № 32, 1968	Инджектор и соплодержатель выполнены из деталей корпуса
7	230399	Инжекционная газовая горелка. Институт газа АН УССР	В.Ф. Копытов, А.В. Марковский, Г.С. Марченко	Заявка 1966 г. БИ, № 35, 1985	Тканевая излучающе-дожигательная насадка, пропитанная катализатором
8	237321	Излучатель для газовых инфракрасных горелок. СКБ «Газоприборавтоматика»	Н.Н. Воронов В.Ф. Дребенцов	БИ, №8, 1969	Каналы в виде прямоугольных щелей и трапециевидные выступы
9	279849	Радиационная горелка	В.Н. Белокрыльцев, В.Ф. Дребенцов	БИ, № 27, 1970	Поверхность керамического излучателя выполнена в виде гребешков и канавок



№ п/п	Номер патентного документа	Название изобретения Заявитель/ Патенто- обладатель	Автор(ы)	Дата публикации	Примечания
10	314970	Излучающая горелка. ГипроНИИГаз	Б.П. Адинсков и др.	БИ, № 28, 1971	Горелка внутри дефлектора обте- каемой формы. Прозрачный экран
11	314972	Газовая инфракрасная горелка. НИИ строи- тельного производства	А.А. Худенко и др.	БИ, № 28, 1971	Горелка в кожухе. Отверстия для удаления продук- тов сгорания
12	315875	Инфракрасный газо- вый нагреватель	А.А. Худенко	БИ, № 29, 1971	Экран из кварце- вого стекла
13	317862	Радиационная горел- ка. НИИ строительно- го производства	А.А. Худенко и др.	БИ, № 31, 1971	С нагревом и распылом воды для тепловлаж- ностной обработ- ки строительных материалов
14	338746	Газовая беспламенная горелка. НИИ строи- тельной керамики	Н.С. Гаврилов и др.	БИ, № 16, 1972	Насадка из пено- керамического материала (пено- кордиерита)
15	340839	Излучающая горелка. ГипроНИИГаз	Б.П. Адинсков, Е.П. Шуркин, Е.Н. Тихоми- рова	БИ, № 18, 1972	В полости реф- лектора патрубков для подогрева топлива. Регулятор соотношения «газ — воздух»
16	370413	Радиационная горелка	В.П. Проняев, Б.З. Винокур	БИ, № 11, 1973	Внутри пористого керамического из- лучателя патрубков подачи ТВС
17	378682	Радиационная газовая горелка. СКБ № 3 Минавтопрома	В.П. Проняев Б.З. Винокур	БИ, № 19, 1973	Керамический излучатель из чередующихся пористых и газоп- лотных элементов
18	572626	Радиационная горелка (доп. к а.с. № 317862). НИИ строительного производства	А.А. Худенко, Ю.С. Наумов, Л.А. Задорова	БИ, № 34, 1977	Тепловлажностная обработка строи- тельных матери- алов
19	732623	Газовая беспламенная горелка. ВНИИ ис- пользования газа	Ж.В. Мирзоян и др.	БИ, № 17, 1980	Насадка из разно- плотных концен- трических полос или колец
20	737706	Излучающая насад- ка газовой горелки. ВНИИ использования газа	Ж.В. Мирзоян, Л.М. Новиков	БИ, № 20, 1972	Каналы насадки с пористыми вкла- дышами в виде конуса, куба и полусферы

№ п/п	Номер патентного документа	Название изобретения Заявитель/ Патенто-обладатель	Автор(ы)	Дата публикации	Примечания
21	800491	Излучающая горелка. ГипроНИИгаз	Е.П. Щуркин, В.А. Терентьев, В.В. Мешков	БИ, № 4, 1981	Две сетки, во внешней – отверстие
22	805007	Излучающая горелка. ГипроНИИгаз	Е.П. Щуркин, В.В. Мешков, С.О. Корюкин	БИ, № 6, 1981	Трубчатый тепло- обменник для исп- арения жидкого топлива. Ремонт дорог
23	840578	Излучающая горелка. ГипроНИИгаз	Е.П. Щуркин, В.А. Терентьев, А.В. Стругов- щикова	БИ, № 23, 1981	Насадка вогнутая с каналом в центре для отвода продук- тов сгорания
24	844927	Излучающая горелка	Е.С. Арсеньев и др.	БИ, № 25, 1981	Жидкое топливо и воздух подог- реваются. Нагре- ватель – короб с теплообменной набивкой
25	877234	Излучающая горелка. Калининградский университет	О.Н. Брюханов, В.Г. Харюков	БИ, № 40, 1981	Прозрачное дни- ще, рефлектор, металлические сетки
26	1070380	Излучающая горелка. ГипроНИИгаз	Б.П. Адинсков	БИ, № 4, 1984	Коническая на- садка из металли- ческих сеток
27	1104984	Излучающая горелка	С.П. Кондра- тьев и др.	БИ, № 5, 1990	Смеситель с плос- кими стенками, одна из стенок – днище корпуса
28	1206559	Горелочное устрой- ство местного нагрева. ГипроНИИгаз	Е.П. Щуркин, Л.М. Фастов	БИ, № 3, 1986	Кожух с каналами для взрывобезо- пасности
29	1228587	Плиточный излучаю- щий элемент инфра- красной горелки. СКБ института ядер- ных исследований АН УССР	С.П. Кондра- тьев и др.	БИ, № 45, 1991	Излучатель имеет углубления с плоским дном
30	1455136	Газовая инфракрасная горелка. НПО Мосго- рисполкома	Ж.В. Мирзоян, Э.В. Петухов, М.Ф. Крылов	БИ, № 4, 1989	Волокнистая насадка из мулли- токремнезёма
31	1725769	Газовая горелка инф- ракрасного излучения	Г.Т. Ковшенин и др.	БИ, № 13, 1992	Соосная насадка смесителя выпол- нена с возможнос- тью перемещения

№ п/п	Номер патентного документа	Название изобретения Заявитель/ Патенто-обладатель	Автор(ы)	Дата публикации	Примечания
32	1820152	Излучающая газовая горелка. НПО «Физика – Солнце» АН УЗССР	В.С. Трунов, В.И. Чембарисов	БИ, № 21, 1993	Цилиндрическая перфорированная металлическая обечайка
33	1831640	Газовая горелка. Казанский ИСИ	А.П. Давыдов, М.Г. Зиганшин	БИ, № 28, 1993	Горение вблизи гофрированного листа-экрана
<i>Патенты Российской Федерации F 23 D 14/12, 14/14</i>					
34	2057989	Газовая горелка инфракрасного излучения. ГАСА (Н. Новгород)	Х.И. Акчурин	БИ, № 10, 1996	Верхнее излучающее основание, перфорированный смесераспределитель
35	2065123	Газовая горелка инфракрасного излучения. АООТ «Эталон»	Г.И. Тягунов и др.	БИ, № 22, 1996	Соотношение размеров излучателя
36	2066023	Радиационная горелка. НИИ прикладной механики МАИ	В.А. Александров и др.	БИ, № 24, 1996	Перфорированная крышка-экран. Многосопловая или центробежная форсунка
37	2084762	Горелка инфракрасного излучения	Ю.А. Жебрак и др.	БИ, № 20, 1997	Отражатель с полкой. Отверстия квадратного профиля
38	2094703	Радиационная газовая горелка. АО «ФИЛБОР»	А.Ф. Геков и др.	БИ, № 30, 1997	Металловолоконная пористая насадка
39	2110015	Инфракрасный излучатель, способ проведения процесса и т. д. Институт катализа СО РАН	В.И. Анিকেев, Н.А. Кузин, А.В. Гудков	БИ, № 12, 1998	Объемная керамическая насадка с температурой поверхности до +1500°С
40	2116568	Газовая горелка инфракрасного излучения. АООТ «Эталон»	В.С. Барышников, Г.Н. Тягунов	БИ, № 21, 1998	На выходе диффузора – рассеиватель из стеклоткани. Панель из кремнийполимерного каталитического материала
41	2137040	Газовая беспламенная горелка. Институт механики СО РАН	В.К. Баев, А.В. Потапкин, А.К. Трубицын	БИ, № 25, 1999	Сменная насадка различного профиля, газопроницаемые регуляторы смеси
42	2151956	Радиационная горелка. Институт химической физики РАН	В.М. Шмелёв, А.Д. Марголин	БИПМ, № 18, 2000	Радиационный экран из кварцевых пластин или цилиндров

№ п/п	Номер патентного документа	Название изобретения Заявитель/ Патенто-обладатель	Автор(ы)	Дата публикации	Примечания
43	2151957	Радиационная горелка. Институт химической физики РАН	В.М. Шмелёв, А.Д. Марголин	БИПМ, № 18, 2000	Перфорированная насадка объёмной конфигурации в виде полостей
44	2186293	Газовая горелка инфракрасного излучения. Патентообладатель: авторы	К.Э. Гулицкий, М.Е. Кичкировский, О.М. Шехтман	БИПМ, № 21, 2002	Керамический излучатель в виде N-гранной призмы с сеткой. Зонт-отражатель. Отвод продуктов сгорания
45	2272219	Радиационная горелка. Институт химической физики РАН	В.М. Шмелёв	2006.03.20	Насадка в виде двухступенчатых полостей-сот
46	59776 U	Жидкотопливная горелка инфракрасного излучения. ФГУП «Таганрогский НИИС»	Е.А. Смирнов, И.М. Чекрыгин, Е.А. Долгошеев	БИПМ, № 36, 2006	Генератор ультразвуковых колебаний
47	2313727	Радиационная газовая горелка инфракрасного излучения. ОАО «Инфракрасный МКР»	В.Н. Банин, Д.П. Прунов	27.12.2007	Насадка из газопроницаемой пластины и лабиринтных каналов
48	2348863	Беспламенный инфракрасный излучатель ЗАО «ЛЕНДОРС-ТРОЙ-2»	В.В. Гурьянов, Ю.Л. Куканов, С.А. Мудрецов	10.10.2008 10.03.2009	Для нагрева дорожного покрытия при ремонте
49	2367846	Способ сжигания газа и горелка для его осуществления. ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»	В.Н. Пелипенко, Д.Ю. Слесарев	27.09.2007 20.09.2009	Бедная ГВС с $\alpha = 1,3 \div 1,5$ . Горелка снабжена экраном

## Содержание

Условные обозначения.....	3
Введение.....	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	7
1.1. Инфракрасное излучение.....	7
1.2. Классификация инфракрасных излучателей.....	10
1.3. Обзор литературных источников.....	15
1.4. Устройство инфракрасных горелок «светлого» типа.....	17
1.5. Патентные исследования «светлых» инфракрасных излучателей.....	20
1.6. Сравнительный анализ инфракрасных горелок «светлого» и «темного» типа.....	27
1.7. Обзор производителей и рынка инфракрасных излучателей «светлого» типа.....	33
1.8. Опыт использования инфракрасных нагревателей «светлого» типа.....	38
Контрольные вопросы к разделу 1.....	42
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	43
2.1. Постановка задачи.....	43
2.2. Температура в зоне горения газа и на поверхности керамических матриц.....	44
2.3. Пределы устойчивой работы горелок инфракрасного излучения.....	49
2.4. Гидравлический режим газовых инфракрасных горелок .....	51
2.5. Тепловой баланс горелки инфракрасного излучения.....	55
2.6. Способы увеличения КПД инфракрасных горелок.....	62
2.7. Образование вредных веществ при сжигании газа в горелках инфракрасного излучения.....	65
Контрольные вопросы к разделу 2.....	69
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	70
3.1. Экспериментальные стенды.....	70
3.2. Методики исследования.....	72

3.3. Характеристика аппаратного и приборного оснащения.....	77
3.4. Планирование эксперимента.....	80
3.5. Результаты работы горелок на газе низкого давления.....	90
3.6. Результаты конструктивного расчёта.....	96
3.7. Результаты тарировки расхода газа.....	98
3.8. Результаты работы горелок на газе среднего давления.....	99
3.9. Сравнительный анализ результатов исследований.....	102
Контрольные вопросы к разделу 3.....	108
Библиографический список.....	109
Приложение.....	111

Учебное издание

*Пелипенко Виктор Николаевич  
Слесарев Денис Юрьевич*

ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ  
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор *О.И. Елисеева*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 18.12.2012. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 6,85.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-05-12.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

