

УДК 662.61

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ
ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*канд. техн. наук, доц. В.В. БУЛАХ
(Полоцкий государственный университет)*

Приведены результаты исследования газовой горелки инфракрасного излучения с металлотетчатым излучателем для отопления больших производственных помещений. На основании исследований разработан опытный образец горелки, разработан проект лучистого отопления, изготовлена опытная партия горелок и выполнен монтаж системы лучистого отопления участка шлифовки РПУП «Завод «Измеритель».

В настоящее время Республика Беларусь испытывает большие сложности с обеспечением всех потребителей (промышленных, сельскохозяйственных, коммунально-бытовых и др.) необходимым количеством топливно-энергетических ресурсов. Это и понятно, ведь в нашей республике добывается лишь небольшое количество топливных ресурсов, в том числе и газа. Этого количества газа хватает для удовлетворения нужд лишь небольшой части его потребителей. Большая же часть газа, необходимая для народного хозяйства республики, поступает из-за рубежа, главным образом из России. В таких условиях проблема рационального использования энергоносителей приобретает решающее значение. Одной из задач в решении этой сложной проблемы является замена конвективного теплообмена лучисто-конвективным или лучистым. В этом случае, за счет интенсификации теплопередачи излучением, происходит значительная экономия топлива. В этой связи большой интерес представляет разработка и использование для этих целей газовых горелок инфракрасного излучения (ГИИ).

Отличительной особенностью ГИИ, по сравнению с другими газогорелочными устройствами, является то, что основное количество тепла, выделяющегося при сгорании газового топлива (50...60 %) передается излучением.

Интенсивная теплопередача излучением делает ГИИ очень перспективными в различных областях народного хозяйства, где требуется осуществить нагрев, радиационную сушку и термическую обработку различных деталей, продуктов и материалов. Кроме того, ГИИ успешно используются в различных технологических процессах.

Однако наиболее эффективным является использование ГИИ для отопления больших производственных помещений, а также открытых площадок. Во многих случаях рациональным является зонный обогрев при помощи ГИИ тех производственных помещений, в которых технологические процессы происходят с большим выделением тепла. В этом случае экономически выгодным становится зонный обогрев только рабочих мест, а также холодных участков помещений и технологического оборудования,

По данным, приведенным в зарубежных и отечественных источниках, можно сделать вывод о том, что экономия тепловой энергии при использовании ГИИ для отопления производственных помещений составляет 40...50 % [1].

Анализ же капитальных вложений в системы традиционного конвективного отопления и лучистого показывает, что последние системы являются также более экономичными. Экономия составляет 30... 50 % [1].

Газовые горелки инфракрасного излучения - горелки, в которых осуществляется беспламенное сжигание газа, а основное количество тепла передается излучением от огневой насадки. Горелка излучает в действительности не только в инфракрасной, но и в видимой области спектра (температура насадки превышает 800 °С). В газовых горелках инфракрасного излучения происходит сжигание заранее подготовленной газозоудшной смеси, в которой количество воздуха несколько превышает стехиометрическое значение ($a = 1,05...1,15$) [2].

Основные разновидности ГИИ отличаются по типу насадки. Известны горелки с пористой диафрагмой, горелки с перфорированной керамической насадкой, с сетчатыми металлическими насадками, с насадками из каталитической массы.

В горелках с пористой диафрагмой, с перфорированными плитками и с металлическими сетками газозоудшная смесь сгорает непосредственно на выходе из насадки. Сгорание происходит в очень коротких факелах, которые сливаются в сплошной фронт плоского пламени. Часть тепла, выделяющегося при сгорании, передается насадке, которая раскаляется до высоких температур. На фоне раскаленной насадки прозрачное пламя, как правило, не видно. Поэтому они относятся к семейству беспламенных горелок. От раскаленной насадки подогревается поступающая к фронту горения смесь. Благодаря этому повышается скорость распространения пламени и устойчивость его по отношению к отрыву. Устойчивость же по отношению к проскоку обеспечивается малыми размерами отверстий в насадке.

Насадки из пористой диафрагмы отличаются высоким гидравлическим сопротивлением. Поэтому они могут работать только в качестве двухпроводных горелок или же в качестве инжекционных при подаче газа среднего давления.

Существенным недостатком горелок с пористой диафрагмой является возможность закупоривания пор пылью, содержащейся в газозвоздушной смеси, или размягченным под влиянием высоких температур огнеупорным материалом насадки.

Наибольшее распространение в мире и в бывшем СССР получили горелки с перфорированной керамикой, разработанные в 50-х годах немецким ученым Г. Шванком. Здесь, как правило, газозвоздушная смесь готовится в инжекционном смесителе и необходимость в подаче воздуха под давлением отпадает, так как гидравлическое сопротивление перфорированных плиток невелико. Более того, в большинстве случаев удастся использовать для работы этих горелок газ низкого давления, что значительно расширяет возможности их применения. Керамические плитки штампуются из специальной массы, в которую добавляются в качестве заполнителя древесные опилки или древесный уголь. При обжиге плиток заполнитель выгорает, и в массе плитки образуются замкнутые поры, благодаря чему плитка отличается малой теплопроводностью. В плитке расположено большое количество сквозных цилиндрических каналов малого диаметра, через которые проходит газозвоздушная смесь. Смесь сгорает, как и у предыдущей горелки, у наружной поверхности плитки. Горение происходит в зоне малой толщины, и значительная часть тепла передается керамическим плиткам, поверхность которых уже через 40...50 секунд после зажигания разогревается до 800...900 °С. Керамические плитки становятся, в свою очередь, мощным источником теплового излучения, играя роль вторичного излучателя. Конструкция плитки (диаметр и количество каналов, теплопроводность и толщина плитки) должна обеспечивать устойчивое горение в необходимом диапазоне изменения тепловой нагрузки.

Одним из существенных недостатков этого типа горелок является большая хрупкость керамики. В последнее время находят все большее применение ГИИ, в которых керамика заменена металлическими сетками, изготовленными из жаропрочного материала. Коэффициент гидравлического сопротивления огневой насадки этих горелок несколько выше, чем у ГИИ с керамическими плитками, однако и в этом случае можно обойтись без принудительной подачи воздуха и применять инжекционные смесители для газа низкого давления. В горелках такого типа газозвоздушная смесь сгорает в пространстве между двумя сетками, причем нижняя сетка имеет ячейки малого размера, чтобы предотвратить проскок пламени в смеситель. При одних и тех же тепловых нагрузках температура излучающей насадки у ГИИ с металлическими сетками ниже, чем у ГИИ с керамическими плитками, но эффективная поверхность излучения несколько больше, так как обе сетки являются излучателями. Поэтому величина лучистого коэффициента полезного действия (отношение количества тепла, передаваемого от огневой насадки излучением, ко всему количеству тепла, выделяющегося при сжигании газа) у обоих типов горелок примерно равна и составляет 55...60 % [3]. У ГИИ с сетчатыми металлическими излучателями удастся довести температуру сеток до 1100 °С и получить, благодаря этому, большие плотности излучения, что необходимо для некоторых областей применения.

Газовые горелки инфракрасного излучения отличаются двумя основными чертами - высокой полнотой сгорания газа и передачей основного количества тепла излучением. Особенно следует остановиться на их экологическом преимуществе перед другими горелками. Условия сжигания газа обеспечивают одновременное снижение эмиссии как оксида углерода, так и оксидов азота. Снижение эмиссии оксида углерода достигается за счет сжигания заранее подготовленной однородной газозвоздушной смеси, а снижение эмиссии оксидов азота - за счет снижения температуры горения, благодаря отдаче тепла от пламени излучателю. Кроме того, в продуктах сгорания полностью отсутствуют ароматические углеводороды, в том числе и канцерогенные. Специальные исследования, проведенные в Ленинградском инженерно-строительном институте, показали, что в зоне горения выгорает даже то количество 3,4-бензопирена, которое содержалось в воздухе, пошедшем на горение.

Преимущества ГИИ с экономической и экологической точек зрения делают их весьма перспективными при использовании в целом ряде отраслей народного хозяйства.

Первой областью массового применения ГИИ стало лучистое отопление больших производственных помещений и открытых мест. Преимущество лучистого отопления перед обычными системами отопления заключается прежде всего в том, что двухатомные газы, из которых в основном состоит воздух, не поглощают инфракрасных лучей. Благодаря этому резко снижаются потери тепла на вентиляцию и сокращается расход энергии на отопление. Применение лучистого отопления становится тем более выгодным, чем больше объем помещения и кратность воздухообмена. Если же отапливаемое помещение сообщается с открытым воздухом большими проемами или отапливаемый объект находится под открытым небом, то лучистое отопление становится вообще единственным приемлемым методом отопления. Горелки инфракрасного излучения успешно применяются для отопления цехов, складских помещений, открытых ресторанов и кафе, трибун стадионов, открытых рабочих мест и строительных площадок, сель-

скохозияственных производственных помещений (животноводческих и птицеводческих ферм, теплиц), обогрева отдельных объектов, находящихся на открытом воздухе (например, торговых автоматов) и т.п.

Указанное преимущество излучающих горелок позволяет широко и успешно использовать ГИИ в строительстве и на транспорте. В строительстве они используются для сушки штукатурки и прогрева кладки при строительстве и ремонте зданий в зимнее время, сушки больших поверхностей в строящихся объектах перед нанесением гидроизоляции, сушки и подогрева строительных материалов, производства железобетонных изделий.

На транспорте они могут быть использованы для обогрева гаражей и безгаражных стоянок автомашин, обогрева железнодорожных платформ и перронов, обогрева и размораживания железнодорожных стрелок в зимнее время, размораживания ходовой части и тормозной системы городского транспорта при профилактическом осмотре. Весьма перспективно использование ГИИ для восстановления сыпучести и оттаивания смерзшихся грузов, перевозимых железнодорожным транспортом.

Газовые горелки инфракрасного излучения также широко применяются для нагрева, тепловой обработки и сушки ряда материалов и изделий. Здесь их преимущество заключается главным образом в том, что при передаче тепла излучением увеличиваются значения коэффициентов теплопередачи к нагреваемому изделию, а лучи в инфракрасной области спектра проникают в глубь некоторых материалов. Благодаря этому значительно ускоряются процессы тепловой обработки и сушки. В ряде случаев некоторые технологические процессы удается перевести благодаря применению ГИИ на конвейер и периодические процессы заменить непрерывными.

Хорошие результаты получены при использовании ГИИ для сушки лакокрасочных и эмалевых покрытий, сушки литейных форм и стержней, термообработки пластмасс, сушки зерна, сушки различных пищевых продуктов и кондитерских изделий. При тепловой обработке пищевых продуктов применение ГИИ позволяет обеспечить хорошие вкусовые качества у ряда продуктов. Это проверено, например, при выпечке хлебобулочных изделий и бисквитов, жарений мяса и т.п. Благодаря этому ГИИ успешно применяются в некоторых конструкциях ресторанных и кухонных плит в качестве горелок для духового шкафа, в конвейерных бисквитных печах. Предварительные опыты показали, что при помощи ГИИ можно создать высокопроизводительные и малогабаритные установки для варки и упаривания жидких и полужидких материалов, заменяя ими в некоторых случаях вакуумные аппараты. Наконец, ГИИ могут применяться в качестве приборов местного отопления жилых и служебных помещений.

Во многих отраслях промышленности применяются установки для тепловой обработки и сушки изделий при помощи инфракрасного излучения, причем источником излучения служат электрические лампы. Применение газовых излучающих горелок для тех же целей имеет следующие преимущества перед электрическими лампами инфракрасного излучения. Газовые горелки инфракрасного излучения более долговечны, чем электрические лампы, которые часто лопаются, и поэтому мало пригодны для использования в пищевой промышленности. Интенсивность излучения с единицы поверхности у ГИИ значительно выше, чем у ламп инфракрасного излучения, и составляет примерно 30 кДж/см²*ч для насадки из перфорированных керамических плиток. Это позволяет сократить размер сушильных установок или же увеличить их производительность. Применение ГИИ позволяет получить значительную экономию на стоимости энергии. Расчеты показывают, что стоимость сушки при использовании ГИИ составляет около 16 % от стоимости сушки электрическими лампами и около 12 % от стоимости сушки в конвективных сушилках [4].

Конструкция модифицированной газовой горелки инфракрасного излучения ГИИМ-7,3М создана на основе авторского свидетельства (а.с. № 1515853, СССР), а также патентов (№ 1799506, СССР) и (№ 400, Республика Беларусь), разработанных сотрудниками Полоцкого государственного университета при непосредственном участии автора настоящей работы. Разработанные конструкции ГИИ имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогами зарубежных стран и стран СНГ. В качестве излучателя в ней предусмотрена металлическая сетка. Это позволяет обеспечить большую надежность излучателя в условиях эксплуатации по сравнению с применяемыми керамическими излучателями, которые обладают большой хрупкостью при ударах и механических повреждениях, а также при попадании на них влаги (воды, снега и т.д.). Преимуществом разработанной ГИИ является также ее ветроустойчивость, позволяющая расширить область применения горелки в установках и системах, работающих на открытом воздухе.

Опыт лабораторных и промышленных испытаний ГИИМ-7,3 показал, что в ее конструкции можно внести ряд изменений, которые улучшат эффективность работы ГИИ. С этой целью были реализованы изменения в конструкции ГИИМ-7,3 в сторону ее модернизации, которые характеризуются новизной.

В соответствии с разработанной конструкторской документацией изготовлен опытный образец модифицированной газовой горелки инфракрасного излучения ГИИМ-7,3М с металсетчатым излучателем.

Стендовые испытания ГИИ проводились в лаборатории «Газоснабжение» Полоцкого государственного университета. Согласно методике, изложенной в [2], были проведены измерения следующих параметров:

- низшей теплоты сгорания газа;
- коэффициента избытка воздуха;

- расходной характеристики горелки;
- зависимости температуры нагрева нижней и верхней сеток от производительности горелки;
- тепловой мощности;
- пределов устойчивой работы горелки;
- содержания окиси углерода в продуктах сгорания;
- содержания суммы окислов азота в продуктах сгорания.

Для измерения указанных выше величин была смонтирована установка, схема которой представлена на рис. 1.

Установка работает следующим образом. Газ от баллона по газопроводу 1 последовательно проходит отключающее устройство 2, газовый счетчик 3 и поступает в сопло 4 газовой горелки 5. Выходя из сопла, газовая струя инжектирует необходимое для полного сгорания количество воздуха. Газовая инфракрасная горелка размещалась в топке 6, где поддерживалось постоянное разрежение, контролируемое при помощи микроманометра 7.

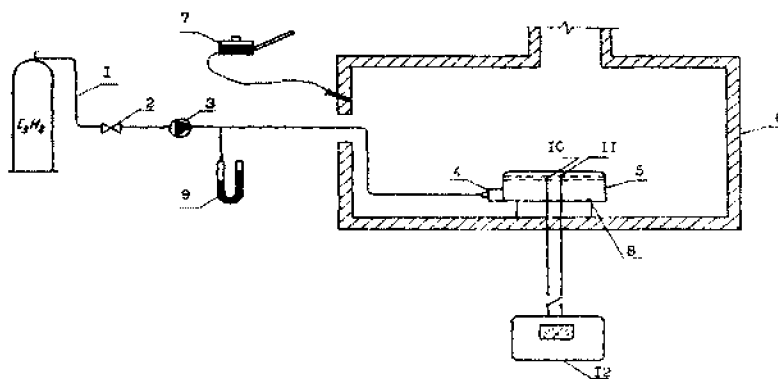


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для теплотехнических испытаний модифицированной газовой горелки инфракрасного излучения ГИИМ-7.3М

Для определения состава газа был использован газоанализатор «Газохром-3101». Низшая теплота сгорания определялась согласно ГОСТ 22667-77 по компонентному составу. Состав газа определялся по методике, изложенной в ГОСТ 14929-79. Отбор проб для определения компонентов инжекции и избытка воздуха осуществлялся через отверстие *S*, размещенное сразу же за смесителем горелки.

Давление газа в газопроводе измерялось при помощи жидкостного U-образного манометра 9. Расход газа определялся при помощи газового счетчика 3 типа ГСБ-400.

Температура сеток излучателя определялась при помощи термопары ХА 10 и ХК 11. Концы термопар выведены на потенциометр 12 типа ПП-63 с возможностью поочередного переключения двух термопар.

Содержание окиси углерода в продуктах сгорания определялось при помощи газоанализатора «Газохром-3101». Отбор проб осуществлялся посредством газозаборной керамической трубки, установленной в центре излучающей поверхности насадки на расстоянии 2 мм от неё. Скорость отсоса пробы составляла 100 мл/мин.

Содержание суммы окислов азота NO_x в продуктах сгорания определялось при помощи газоанализатора УГ-2 линейно-колористическим методом. Для уменьшения погрешностей измерений согласно работе [3] были введены поправочные коэффициенты:

$$C_{NO_x(CO)} = K_t \cdot K_i \cdot K_d \cdot K_p \cdot C_{NO_x(CO)}^{изм},$$

где $C_{NO_x(CO)}$ – содержание окислов азота с учетом поправочных коэффициентов; K_t , K_i , K_d – поправочные коэффициенты на время просасывания, температуру индикаторного порошка и диаметр индикаторных трубок соответственно; K_p – коэффициент разбавления; $C_{NO_x(CO)}^{изм}$ – измеренное содержание окислов азота в продуктах сгорания.

Результаты теплотехнических и экологических испытаний представлены на рис. 2 – 4 и в таблице.

На рис. 2 представлена расходная характеристика ГИИМ-7,3М, в зависимости от давления газа перед газовым соплом. На рис. 3 – зависимость выхода суммы окислов азота и оксида углерода в зависимости от тепловой мощности ГИИМ-7,3М.

Из рисунка видно, что выход оксидов углерода резко падает с увеличением тепловой мощности с 4296 Вт до 7518 Вт и имеет значение при минимальной тепловой мощности равно 0,1 % об. При номинальной тепловой мощности и далее, до максимальной, в процессе эксперимента были отмечены лишь следы оксидов углерода.

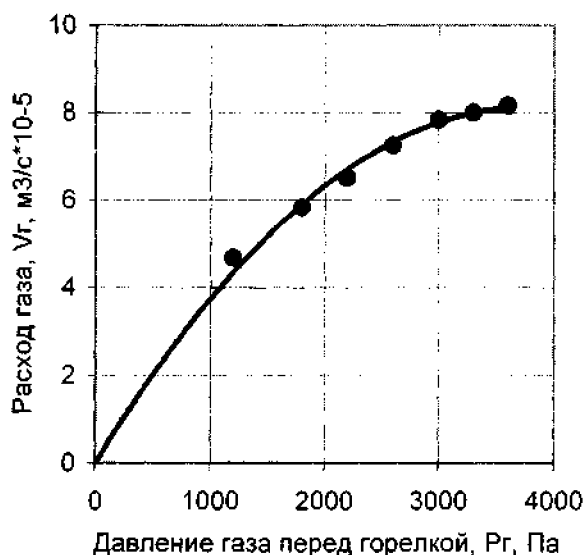


Рис. 2. Зависимость расхода газа от давления газа перед горелкой (газ – пропан технический)

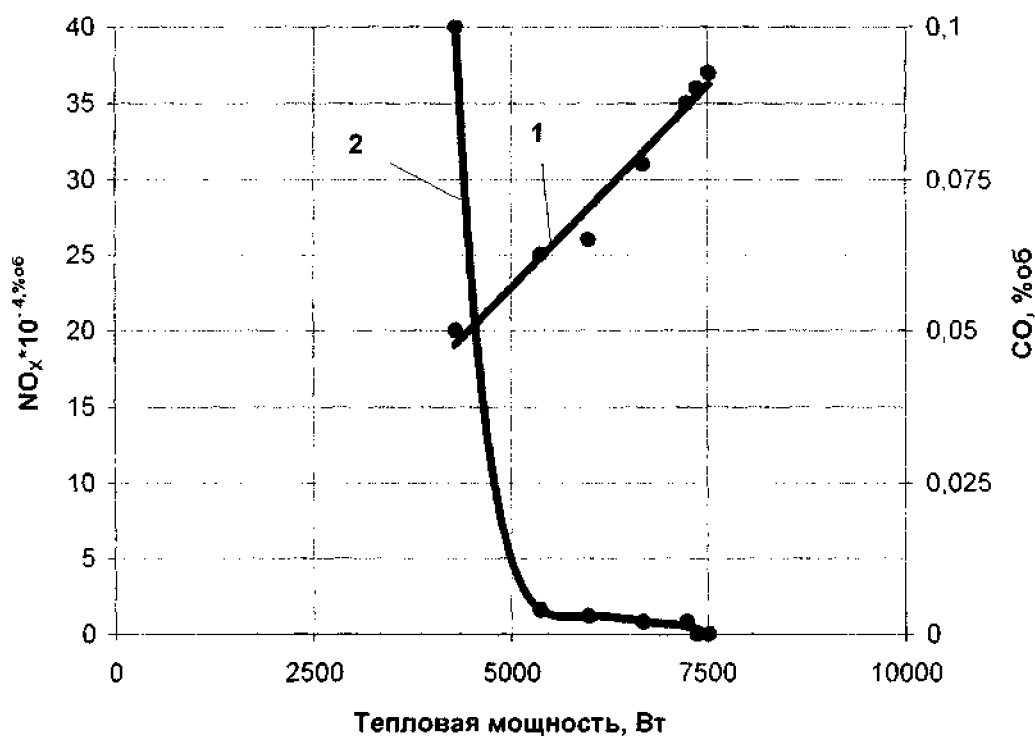


Рис. 3. Зависимость выхода суммы окислов азота (1) и оксида углерода (2) в зависимости от тепловой мощности ГИИМ-7,3М (при $\alpha = 1,0$)

Анализируя выход суммы окислов азота, можно сделать вывод о том, что значения их постоянно росли с увеличением тепловой мощности ГИИМ-7,3М. При минимальной тепловой мощности горелки значение суммы окислов азота составляет $20 \cdot 10^{-4}$ % об., а при максимальной (полученной в процессе эксперимента) – $37 \cdot 10^{-4}$ % об., т.е. остается в пределах нормируемой величины.

Из рис. 3 видно также, что, начиная с мощности ГИИМ-7,3М, равной 6674 Вт, и далее, до значения 7518 Вт, выход оксидов углерода находится в области нормируемой величины и даже имеет значительно меньшее значение.

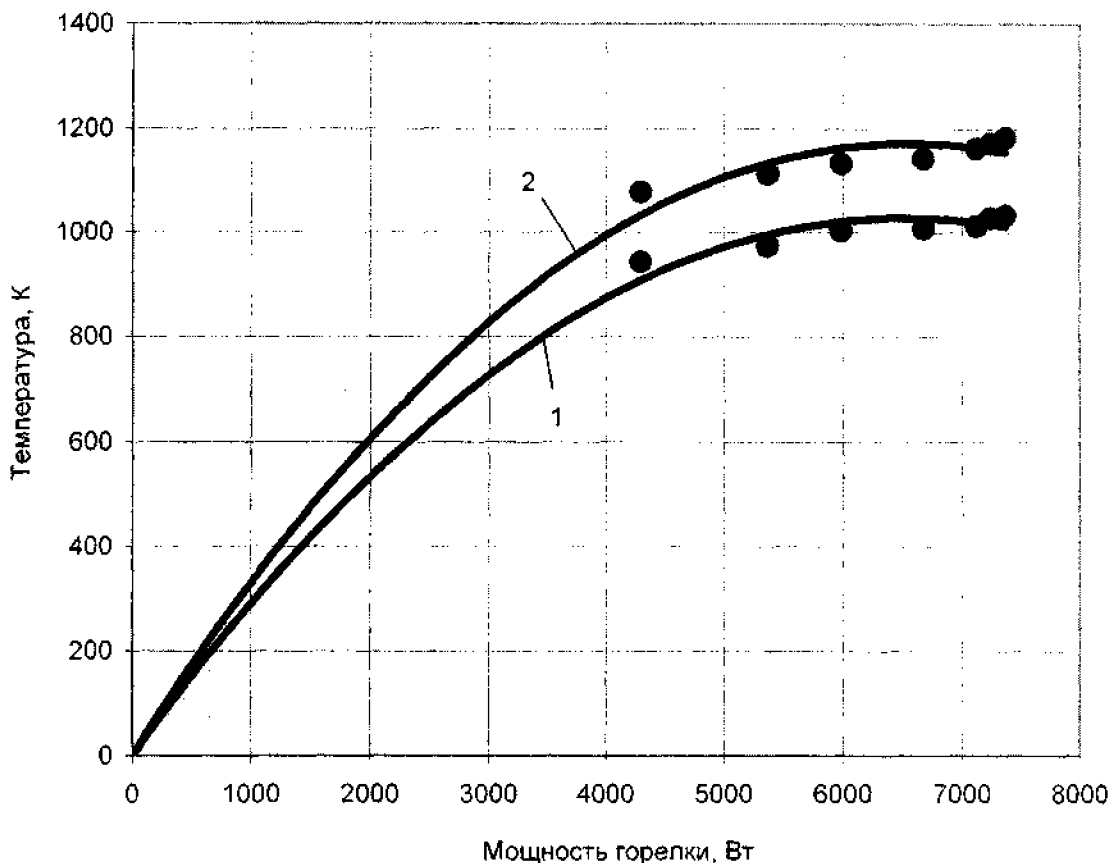


Рис. 4. Зависимость температуры верхней (1) и нижней (2) сеток излучателя от тепловой мощности ГИИМ-7.3М

Результаты проведения эксперимента

Давление газа, Па	Коэффициент избытка воздуха, α	Расход газа, $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-5}$	Расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$	Мощность ГИИ, Вт	Температура нижней сетки, °С/К	Температура верхней сетки, °С/К	Содержание CO, %/об.	Содержание NO _x , 10 ⁻⁴ , %/об.
3600	1,07...1,12	8,17	0,294	7518	910/1183	760/1033	следы	37
3300		8,00	0,288	7364	900/1173	755/1028	следы	36
3000		7,83	0,282	7237	890/1163	740/1013	0,002	35
2600		7,25	0,261	6674	870/1143	735/1008	0,002	31
2200		6,50	0,234	5984	860/1133	730/1003	0,003	26
1800		5,83	0,210	5370	840/1113	700/973	0,004	25
1200		4,67	0,168	4296	805/1078	670/943	0,1	20

Примечания: 1. При испытании ГИИ использовался технически чистый пропан.

2. Теплота сгорания газа $Q_H^u = 2125 \text{ кДж/м}^3$. Плотность газовой смеси $\rho_{см} = 2,04 \text{ кг/м}^3$.

3. Барометрическое давление $P_6 = 101,5 \text{ кПа}$.

4. Температура воздуха в помещении $t_6 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Температура газа $t_f = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Расход газа приведен к нормальным условиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родин А.К. Газовое лучистое отопление. - Л.: Недра, 1987. - 191 с.
2. ГОСТ25696-83 Горелки газовые инфракрасного излучения. Общие технические требования и правила приемки.
3. Левин А.М. Принципы рационального сжигания газа. - Л.; Недра, 1977. - 247 с.