

А. И. БОГОМОЛОВ, Д. Я. ВИГДОРЧИК, М. А. МАЕВСКИЙ

ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ
ИНФРАКРАСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ

Москва—1967

ий.
из
гии
ра-
ас-
эта
ро-
лу-
ич-
ск,
ги-
яв-
от-
ет
ое
ка
а-
е-
я-
о-
ой
х-
е-
а-
з-
и.
е
з

В книге освещены основные вопросы техники инфракрасного излучения, даны рекомендации по расчету и выбору газовых горелок инфракрасного излучения по обогреву помещений и открытых площадок, а также по тепловой обработке различных материалов и изделий. Приведены примеры применения горелок инфракрасного излучения в различных отраслях народного хозяйства и условия их безопасной эксплуатации.

Книга рассчитана на специалистов, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией устройств для обогрева помещений и открытых площадок, а также тепловой обработкой материалов и изделий с помощью газовых горелок инфракрасного излучения.

Книга может быть полезной для студентов средних и высших технических учебных заведений.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существует много способов нагрева материалов и изделий. Однако наиболее эффективным и экономически выгодным из них является лучистый способ, т. е. передача тепловой энергии от ее источника (генератора) к объекту путем излучения.

Большой интерес с этой точки зрения представляет инфракрасное излучение.

Инфракрасные лучи мало подвержены поглощению и рассеянию атмосферой, обладают большой проникаемостью. Эта особенность позволила применить их в различных областях промышленности и коммунального хозяйства. Инфракрасное излучение широко используется для термической обработки различных материалов (плавка,ковка,штамповка,закалка и отпуск,сушка,полимеризация,стимулирование химических и биологических процессов и т. д.).

Инфракрасный нагрев (техника инфракрасного нагрева) является одним из прогрессивных способов термической обработки материалов и отопления (обогрева) помещений. Он дает большую производительность обработки материалов и высокое качество обрабатываемых изделий. Особенно широко техника инфракрасного нагрева и отопления стала применяться с созданием газовых горелок инфракрасного излучения (ГГИИ).

По сравнению с находящимися в эксплуатации электрическими (ламповыми, спиральными или трубчатыми) излучателями ГГИИ имеют ряд преимуществ.

1. Они значительно долговечнее. В отличие от ГГИИ ламповые излучатели лопаются и засоряют осколками и стеклянной пылью обогреваемый материал.

2. Интенсивность (плотность) излучения с единицы поверхности ГГИИ значительно выше, чем у электрических излучателей, что позволяет сократить размеры теплоиспользующих установок.

3. Применение газогорелочных устройств инфракрасного излучения позволяет получить значительную экономию энергии.

4. При использовании ГГИИ достигается более равномерное облучение поверхности объекта.

Существующее среди отдельных специалистов мнение, что при использовании ГГИИ в закрытых сушильных установках повышается пожароопасность вследствие испарения огнеопасных растворителей, опровергается практикой эксплуатации таких установок. При организации соответствующего воздухообмена в указанных сушильных камерах опасность взрыва или пожара исключается. Вместе с тем, в отдельных случаях компоненты продуктов сгорания от ГГИИ способствуют интенсификации технологического процесса. Так, например, при сушке гипсо-алебастровых и цементных материалов наличие углекислоты в продуктах сгорания способствует более ускоренному схватыванию (твердению) вяжущих растворов.

Несмотря на явные выгоды применения газовых горелок инфракрасного излучения, следует отметить, что внедрение их в народное хозяйство страны все еще отстает от темпов развития газовой промышленности. Одна из причин этого положения — недостаточная осведомленность специалистов промышленности, строительства, сельского и коммунального хозяйства о выгодах и особенностях применения техники инфракрасного нагрева.

В данной книге освещены результаты наиболее интересных экспериментальных исследований в этой области, полученные за последние годы в проектных и научно-исследовательских институтах страны. Подавляющее большинство этих работ выполнялось по поручению и при непосредственном содействии Министерства газовой промышленности СССР, что способствовало не только успешному решению ряда проблем, но и внедрению их результатов в народное хозяйство страны.

Авторы не ставили своей задачей всеобъемлющее освещение вопросов современной техники использования инфракрасного излучения. Цель книги иная — собрать воедино сведения о газовых горелках инфракрасного излучения и инфракрасных излучателях, нагреваемых газом, а также имеющийся опыт их использования в народном хозяйстве.

Авторы надеются, что их книга поможет внедрению техники инфракрасного нагрева с использованием газовых горелок в народное хозяйство нашей страны.

ГЛАВА I

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

1. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Различные виды излучения: гамма, рентгеновское, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное, радиоволны и низкочастотные колебания, несмотря на их большие различия в свойствах, имеют одинаковую природу. Все они являются частью спектра электромагнитного колебания и отличаются друг от друга длиной волны.

Интересующее нас инфракрасное излучение по величине длины волны лежит по возрастающей за граничной красной частью солнечного (светового) спектра (рис. 1).

Условно принято считать инфракрасным излучение с длиной волны в пределах 0,77—420 мк.

В практике инфракрасного нагрева с применением газовых горелок инфракрасного излучения или металлических излучателей, нагреваемых обычными газовыми горелками, длина волны излучения находится в пределах 1,5—5 мк.

Длиной волны λ называется расстояние между соседними гребнями или впадинами этой волны. Частотой ν называется число колебаний в секунду. Чем больше длина волны, тем меньше частота. Периодом волны T называется время, за которое совершается одно колебание.

Между этими величинами существует простая зависимость

$$\lambda\nu = \frac{\lambda}{T} = v,$$

где v — скорость распространения колебания.

Распространение электромагнитной волны в пространстве сопровождается переносом энергии по направлению движения волны; эта энергия получила название лучистой энергии.

При современном уровне знаний мы двояко представляем излучение: как поток материальных частиц и как волновое распространение энергии электромагнитного поля. Однако при таком условном делении следует всегда помнить, что данное

явление само по себе едино, следовательно, в каждом процессе, связанном с возникновением, распространением или преобразованием излучения, неизменно проявляются его волновые свойства и свойства потока материальных частиц.

Все существующие в природе излучения составляют непрерывный спектр, распространяющийся от космических лучей с длиной волны около 2×10^{-8} мк до радиоизлучений и излучений

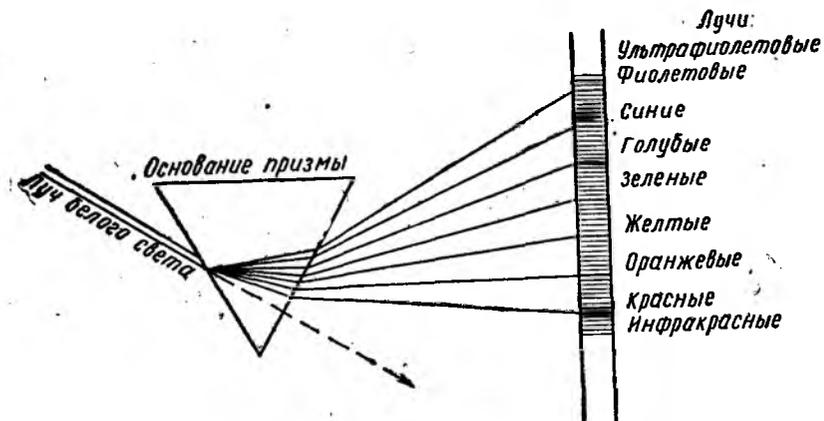


Рис. 1. Схема разложения луча белого света в спектр

генераторов переменного тока промышленной частоты с длиной волны 6000 км.

Гамма-лучи — одни из наиболее коротких лучей спектра. Они возникают при распаде радиоактивных элементов.

Рентгеновские лучи имеют длину волны примерно в 1000 раз меньшую, чем длины волн видимого света. Рентгеновские лучи возникают при столкновениях быстролетающих электронов, которые теряют свою энергию. Часть энергии идет на повышение температуры вещества, а часть выделяется в виде рентгеновских лучей.

Ультрафиолетовые лучи занимают область между рентгеновскими и фиолетовыми лучами видимого излучения. Хорошими техническими источниками ультрафиолетовых лучей являются электрические дуги, а также кварцевые и ртутные лампы. Ультрафиолетовые лучи можно обнаружить фотографическими методами по вызываемой этими лучами флуоресценции и фосфоресценции, а также при помощи фотоэлементов и термоэлементов. Они не проходят через стекло и частично задерживаются даже воздухом.

Видимые лучи занимают в электромагнитном спектре наиболее узкий участок примерно 0,4—0,77 мк. Эта величина была принята условно.

Советскими учеными доказано, что граница видимого участка спектра определяется мощностью источника излучения и степенью адаптации (приспособления) глаза. Так, в инфракрасной области спектра порог чувствительности глаза доходит до 0,85—0,90 мк при увеличении мощности источника излучения в сотни тысяч раз. Свойства и области применения видимых лучей широко известны по курсу физики.

Инфракрасные лучи, невидимые для глаза, занимают область спектра примерно от 0,77 до 420 мк, лежащую между красными лучами видимой части спектра и ультракороткими

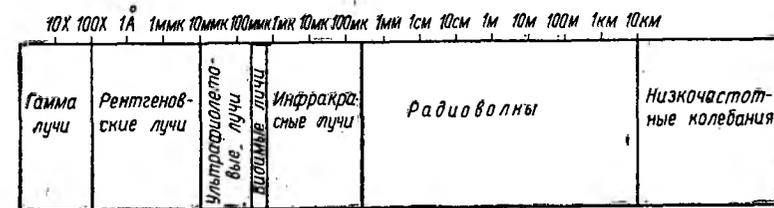


Рис. 2. Положение инфракрасного спектра в общем спектре электромагнитных колебаний

радиоволнами. Они обладают такими же свойствами, как видимые и ультрафиолетовые лучи, т. е. распространяются прямолинейно, преломляются и поляризуются. Инфракрасные лучи излучаются внешними электронами атомов и молекул в результате вращательных и колебательных движений молекул.

Инфракрасные лучи называют иногда тепловыми, так как их интенсивность определяется температурой излучающего тела.

Методы получения и обнаружения инфракрасных лучей различны для разных спектральных участков.

Область инфракрасных лучей можно условно разделить на три участка спектра: коротковолновый (0,77—15 мк), средневолновый (15—100 мк) и длинноволновый (100—420 мк).

В технике инфракрасного нагрева практическое применение имеют коротковолновые инфракрасные лучи.

Инфракрасные, ультрафиолетовые и видимые лучи, занимающие среднюю часть спектра электромагнитных волн, называют иногда оптической областью спектра.

Наибольшей частью оптической области спектра является участок инфракрасных лучей, составляющих девять октав из 15 (рис. 2).

Источниками инфракрасных лучей с длиной волны от 1,3 до 7 мк могут быть электрические лампы накаливания, ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления, специальные штифтовые и колпачковые излучатели, а также газовые горелки ин-

фрактального излучения и металлические или керамические излучатели.

Источниками инфракрасных лучей с длиной волны от 7 до 15 мк являются все нагретые тела с температурой от 190 до 410° К.

Граничная длина волны этого диапазона излучений (15 мк) определяется водяными парами, имеющимися в атмосфере, поскольку водяные пары почти полностью поглощают инфракрасное излучение с длиной волны более 14—15 мк.

2. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ

Процесс превращения тепловой энергии тела в лучистую называется тепловым излучением.

Тепловое состояние тела характеризуется его температурой.

Любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, непрерывно излучает лучистую энергию. В зависимости от температуры и состояния поверхности оно испускает то или иное излучение. Большая часть этого излучения при температурах, которые мы умеем получать, лежит в инфракрасной области.

Так, например, если принять всю энергию, излучаемую вакуумной лампой при температуре вольфрамовой нити $T=2500^{\circ}\text{К}$, за 100%, то только 7—12% лучистой энергии приходится на энергетическое излучение в видимой части спектра, а остальная часть энергии, за исключением небольших потерь в держателях нити накаливания, излучается в пространство в виде инфракрасных лучей.

Если температура объекта превышает 825° К, спектр излучаемой энергии содержит лучи, видимые невооруженным глазом. Изменение цвета объекта обуславливается его тепловым излучением в зависимости от температуры (табл. 1).

Таблица 1

Цвет объекта в зависимости от его температуры

Кажущийся цвет объекта	Ориентировочная температура объекта	
	°С	°К
Едва видимый красный	550	823
Тускло-красный	700	973
Вишнево-красный	900	1173
Оранжевый	1100	1373
Белый	Свыше 1400	Свыше 1673

Результаты простого наблюдения указывают на близкое родство тепловых лучей и лучей видимого света. Вместе с тем мы знаем, что при температуре ниже 825° К излучения становятся невидимыми.

Качественные особенности теплового излучения определяются различием в длинах волн, зависящих от температуры излучателей. При встречающихся в теплотехнической практике температурах передача тепла излучением происходит в ближней инфракрасной области спектра, простирающейся на длины волн от 0,77 до 3 мк, а в средней области спектра с длинами волн 3—10 мк. Излучение в видимой области спектра с длинами волн 0,4—0,77 мк значительно заметно только в электрических излучателях с очень высокими температурами нити накала.

Излучение, испускаемое телом, называют монохроматическим, если оно соответствует узкому интервалу длин волны от λ до $\lambda + d\lambda$ и интегральным (полным), если оно соответствует интегралу длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$.

Если лучистый поток падает на поверхность тела, то одна часть потока отражается (зеркально или диффузно), другая проходит сквозь тело и в зависимости от его коэффициента преломления изменяет свое направление, а третья часть целиком поглощается телом.

Отражательная способность тела (коэффициент отражения) характеризуется отношением отраженной телом лучистой энергии $E_{\text{отр}}$ к падающей энергии $E_{\text{пад}}$:

$$r = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}$$

Пропускательная способность тела (коэффициент пропускания) характеризуется отношением пропущенной телом лучистой энергии к падающей энергии:

$$d = \frac{E_{\text{проп}}}{E_{\text{пад}}}$$

Поглощательная способность тела (коэффициент поглощения) характеризуется отношением поглощенной телом лучистой энергии $E_{\text{погл}}$ к падающей энергии $E_{\text{пад}}$:

$$a = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}$$

Из сказанного следует, что между a , r и d существует зависимость, т. е.

$$a + r + d = 1.$$

Отражение падающего потока может быть зеркальным (угол падения равен углу отражения) или диффузным (рассеянным). Зеркальное отражение дают полированные поверхности, причем величина коэффициента отражения r зависит от степени полировки поверхности. Коэффициенты пропускания и поглощения зависят от химического строения и структуры вещества, а также от толщины слоя облучаемого вещества. Для жидких и газообразных веществ величина этих коэффициентов характе-

ризуется размерами и количеством отдельных частиц составляющих эти вещества. Если

$$a = 1 \text{ и } r = d = 0,$$

то вся лучистая энергия, падающая на тело, поглощается им. Такое тело принято называть абсолютно черным. Если

$$r = 1 \text{ и } a = d = 0,$$

то вся лучистая энергия, падающая на тело, отражается им. Такое тело принято называть абсолютно белым.

Если

$$d = 1, \text{ то } a = r = 0.$$

В этом случае лучистая энергия, падающая на тело, проходит через него. Такое тело называется абсолютно прозрачным (диатермичным).

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 (наши обычные оценки цвета поверхности неприменимы к инфракрасному излучению; большинство поверхностей по коэффициенту поглощения может быть отнесено к разряду «черных»). Все твердые тела и жидкости (в слое толщиной в несколько мм) для области инфракрасного излучения практически не прозрачны. Для них $d=0$ и $a+r=1$. Газы, за исключением углекислоты и водяных паров, для этой области спектра диатермичны.

Следовательно, если данное тело хорошо отражает лучистую энергию, то это же тело плохо поглощает ее и наоборот. Однако существуют тела, которые в определенном диапазоне волн и при определенной толщине их слоя являются прозрачными для лучистой энергии.

Например, кварц при толщине до 1 мм прозрачен для световых, ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, но при толщине в несколько мм он уже становится непрозрачным для инфракрасных. Оконное стекло прозрачно для световых лучей (опять-таки до определенной толщины), но непрозрачно для ультрафиолетовых и инфракрасных с длиной волны λ более 5 мк. Каменная соль прозрачна для инфракрасных лучей и непрозрачна для ультрафиолетовых.

Аналогичное положение наблюдается также при поглощении и отражении лучистой энергии. Белые поверхности хорошо отражают видимые световые лучи и практически поглощают инфракрасные. 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

Таблица 2

Величины a , r и d для некоторых материалов

Материалы	Коэффициенты в %			Толщина материала в мм
	a	d	r	
Прозрачное бесцветное стекло	1—3	89—91	Около 8	1—3
Матовое стекло (матировка песком внутренняя)	3—16	72—85	12—15	1,8—4,4
Молочное густое стекло	4—28	10—66	30—76	1,3—6,2
Молочное стекло, хорошо пропускающее свет	4—6	45—55	40—50	1,5—2
Мрамор полированный	27—47	3—6	50—61	8,1—3,3
Алебастр (гипс)	11—16	33—47	43—53	—
Пергамент тонкий белый	10—15	35—55	40—50	—
Бумага светлая	13—20	42—50	33—40	—
Бумага темная	17—23	30—45	40—50	—
Шелк белый	5	60	35	—
Белая покраска	33—20	—	67—80	—
Бархат черный	99,6	—	0,4	—
Сукно черное	98,8	—	1,2	—

черную или сажей. В ограниченном интервале длин волн они поглощают до 90—96% инфракрасного излучения.

В табл. 2 приведены величины a , r и d для некоторых материалов при облучении световыми и близкими к ним инфракрасными лучами.

Наиболее полно свойствами абсолютно черного тела обладает отверстие в стенке полого шара, предложенное русским физиком В. А. Михельсоном.

Это тело, схема которого показана на рис. 3, представляет собой полый шар с небольшим отверстием и зачерненной внутренней поверхностью, поглощательная способность которой равна 90%. Если направить поток лучистой энергии через отверстие шара, то при падении луча на внутреннюю стенку 90% энергии поглотится, отраженный же от нее лучистый поток (10%) снова попадет на стенку и при вторичном отражении снизит свою энергию до 1% первоначальной величины, а при последующем отражении до 0,1%. Если лучистый поток выйдет из отверстия после трехкратного отражения, то суммарная поглощательная способность полого тела будет равна 0,999, т. е. очень близка к единице.

Внутренняя поверхность полого тела не только поглощает, но при нагреве его до определенной температуры излучает как абсолютно черное тело. Эти особенности отражения и поглощения лучистой энергии в полом шаре проявляются и в практике

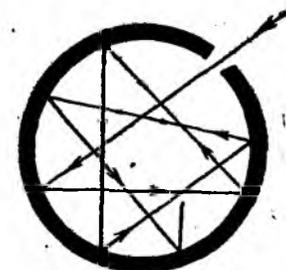


Рис. 3. Принципиальная схема абсолютно черного тела

ских условиях инфракрасного нагрева тел. Так, например, чем глубже впадины (шероховатость) на поверхности облучаемого тела, тем выше его поглотительная способность по сравнению с более гладкой поверхностью данного тела. Этим можно объяснить увеличение поглотительной способности тел при увеличении их шероховатости или пористости.

При расчетах, связанных с лучистым теплообменом, применяются понятия о лучистом потоке Q , энергии излучения E и спектральной интенсивности излучения I .

Лучистым потоком называется полное количество энергии, излучаемое поверхностью тела F в единицу времени, т. е.

$$Q = EF \text{ ккал/ч.}$$

Эта величина характеризует полную мощность излучателя.

Энергией излучения называется количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела в единицу времени.

$$E = \frac{Q}{F}.$$

Эта величина характеризует удельную мощность излучателя.

Спектральной интенсивностью излучения называется удельная энергия монохроматического излучения, характеризующая спектральную удельную мощность излучателя, т. е.

$$I = \frac{dE\lambda}{d\lambda} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мк.}$$

Излучение любого твердого тела характеризуется непрерывным спектром распределения энергии излучения по длинам волн, однако сам спектр излучения является неравномерным и различным для разных тел.

В основу теплотехнических расчетов при излучении положены универсальные законы излучения абсолютно черного тела, поглощающего излучения любой длины волны. Распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела в зависимости

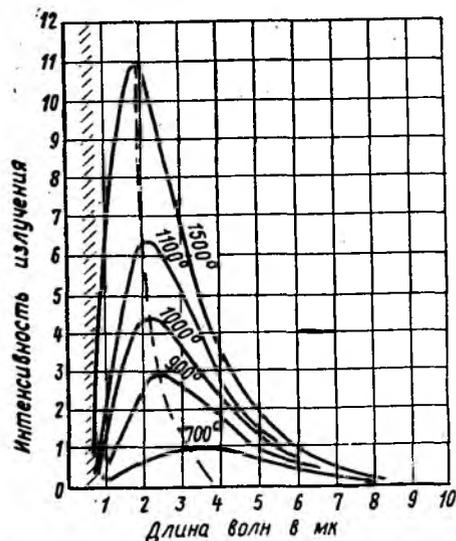


Рис. 4. Спектральное распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела (заштрихованная часть — видимый свет)

от его температуры и длины волны излучения показано кривыми на рис. 4. Характерными особенностями этих кривых являются: наличие разных максимумов интенсивности излучения для различных температур, резкий спад кривых в сторону коротких волн и пологий спад в сторону длинных волн. Это справедливо и для применяемых в практике излучателей (за исключением газовых с пористыми излучающими насадками), интенсивность излучения которых показана на рис. 5.

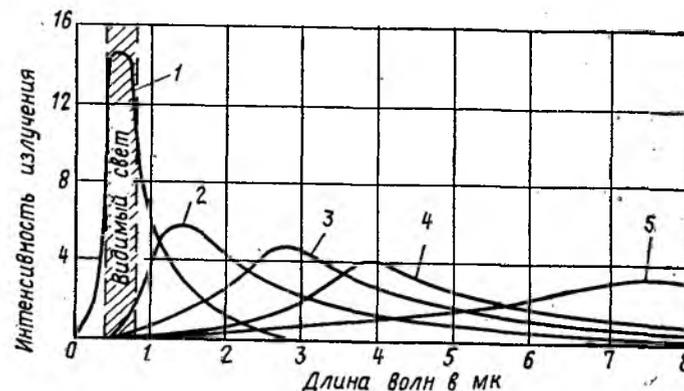


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения различных тел

1 — солнце $t > 6000^\circ \text{C}$; 2 — инфракрасная лампа с вольфрамовой нитью $t = 1900^\circ \text{C}$; 3 — керамический излучатель с температурой поверхности 800°C ; 4 — темный излучатель с температурой поверхности 500°C ; 5 — радиаторы центрального отопления с температурой поверхности 98°C

Об особенностях спектра излучения газовых горелок инфракрасного излучения с пористыми насадками будет сказано ниже.

Закон Планка устанавливает зависимость интенсивности излучения для черного тела от длины волны λ и от абсолютной температуры T :

$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мк.},$$

где I — лучеиспускательная способность;
 λ — длина волны.

Планк установил, что для абсолютно черного тела интенсивность излучения равна:

$$I_{\lambda 0} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1},$$

где C_1 — постоянная, равная $3,22 \cdot 10^{-16}$ ккал \cdot м²/ч;
 C_2 — постоянная, равная $1,44 \cdot 10^{-2}$ м \cdot °К.

Из выражения для $I_{\lambda 0}$ видно, что при $\lambda = 0$ и $\lambda = \infty$ $I_{\lambda 0} = 0$. Следовательно, черное тело испускает лучи с различной длиной волны при $T > 0$. Отсюда следует, что с повышением температуры тела интенсивность излучения увеличивается, достигая известного максимума в интервале между предельными значениями $\lambda = 0 \div \infty$. При малых значениях λT последнее выражение может быть упрощено.

Графическое изображение закона Планка приведено на рис. 4, из которого видно, что каждой температуре T отвечает своя кривая $I_{\lambda 0}$, имеющая максимум тем больший, чем выше температура. С увеличением T максимумы $I_{\lambda 0}$ смещены в сторону более коротких волн (λ_m).

Закон смещения максимумов $I_{\lambda 0}$ сформулирован Вином до закона Планка. Закон Вина аналитически может быть получен, если производную $\frac{dI}{d\lambda}$ приравнять нулю и решить полученное уравнение относительно произведения $\lambda_m T$. Таким образом, можно получить математическое выражение этого закона.

$$\lambda_m T \approx 2,9 \text{ мк}^\circ \text{К} = \text{const.}$$

Следовательно, длина волны, при которой $I_{\lambda 0}$ имеет максимум при заданной температуре

$$T\lambda \approx \frac{2,9}{T} \text{ мк.}$$

Если это выражение подставить в выражение для $I_{\lambda 0}$, то максимум интенсивности излучения, пропорциональный пятой степени температуры, резко возрастает с увеличением T .

Пользуясь этим законом, легко определить длину волны, соответствующую максимуму интенсивности излучения абсолютно черного тела.

Закон Стефана — Больцмана устанавливает зависимость полной энергии излучения абсолютно черного тела от температуры. Количество энергии, излучаемой черным телом при любой длине волны при данной температуре T , может быть найдено из выражения

$$dE_0 = I_{\lambda 0} d\lambda,$$

если это выражение проинтегрировать в пределах от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

Таким образом, лучеиспускающая способность черного тела

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{\lambda 0} d\lambda = C_1 \int_0^{\infty} \frac{I}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \cdot \frac{I}{\lambda^5} d\lambda.$$

Решение этого интеграла может быть получено, если интегральную функцию $\frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$ разложить в следующий ряд:

$$e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} + e^{-\frac{2C_2}{\lambda T}} + e^{-\frac{3C_2}{\lambda T}} + \dots$$

Окончательное решение представится в таком виде:

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Числовое значение σ_0 при приведенных выше постоянных C_1 и C_2 составляет:

$$\sigma_0 = 4,96 \cdot 10^{-8} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°К}^4.$$

Величина σ_0 называется коэффициентом (или постоянной) излучения абсолютно черного тела. Так как числовое значение σ_0 очень мало, а T велико, то выражению для E_0 в технических расчетах удобнее придать вид

$$E_0 = C_0 (0,017T)^4,$$

где $C_0 = 4,96 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°К}^4$.

Приведенные формулы для E_0 представляют математическое выражение закона Стефана — Больцмана.

Закон Стефана — Больцмана остается справедливым и для других тел, которые, как и черные тела, имеют непрерывный спектр излучения. Такие тела, для которых соблюдается закон четвертых степеней $E = C (0,011T)^4$, называются серыми телами, а их излучение — серым. Для таких тел отношение спектральной интенсивности излучения к интенсивности черного излучения при той же длине луча для всего интервала длины волн от 0 до ∞ остается постоянным, т. е.

$$\frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} = \text{const.}$$

Таким образом, спектр серого излучения имеет такой же характер, как и спектр черного тела. Из этого следует, что степень черноты тела при любой длине волн

$$\varepsilon = \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} = \frac{E}{E_0} = \frac{C}{C_0} < 1.$$

Для идеально серого тела при всех температурах $\varepsilon = \text{const}$ и его энергия излучения

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 (0,017T)^4,$$

т. е. она меньше энергии излучения черного тела при той же температуре; ε (степень черноты тела) — безразмерная величина, которая меняется от 0 до 1; для ряда материалов значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Степень черноты ϵ для различных материалов

Материалы	t в °С	ϵ
Алюминий полированный	50—100	0,04—0,06
» шероховатый	20—50	0,06—0,07
Железо полированное	400—1000	0,14—0,38
» обработанное наждаком	20	0,242
» окисленное	100	0,736
» окисленное гладкое	125—525	0,78—0,82
» литое необработанное	900—1100	0,87—0,95
Стальное литье полированное	770—1040	0,52—0,56
Сталь листовая шлифованная	940—1100	0,55—0,61
Чугун обточенный	800—1000	0,6—0,7
Окись железа	500—1200	0,85—0,95
Золото полированное	225—635	0,018—0,035
Латунная пластина:		
прокатанная с естественной поверхностью	20	0,06
прокатанная, обработанная грубым наждаком	20	0,2
тусклая	20—350	0,22
Медь, тщательно полированная, электролитная	80—115	0,018—0,023
Медь шабрена до блеска, но не зеркальная	20	0,07
Окись меди	800—1100	0,66—0,54
Расплавленная медь	1100—1300	0,13—0,15
Молибденовая нить	700—2500	0,1—0,3
Никель технически чистый, полированный	200—400	0,07—0,09
Никелированное травленое железо неполоированное	20	0,11—0,4
Никелевая проволока	200—1000	0,1—0,2
Окись никеля	500—1250	0,52—0,86
Хромоникель	125—1034	0,64—0,76
Олово, блестящее луженое листовое железо	20—50	0,04—0,06
Платина чистая, полированная пластина	200—600	0,05—0,1
Платиновая лента	900—1100	0,12—0,17
» нить	25—1230	0,036—0,092
» проволока	225—1375	0,073—0,182
Ртуть очень чистая	0—100	0,09—0,12
Свинец серый окисленный	20	0,28
Серебро полированное чистое	200—600	0,02—0,03
Хром	100—1000	0,08—0,26
Цинк торговый (99,1%) полированный	200—300	0,04—0,05
Оцинкованное листовое железо блестящее	30	0,23
Оцинкованное листовое железо серое окисленное	20	0,28
Асбестовый картон	20	0,96
Асбестовая бумага	40—400	0,93—0,95
Бумага тонкая, наклеенная на металлическую пластину	20	0,924
Вода	0—100	0,95—0,98
Гипс	20	0,8—0,9
Дуб строганный	20	0,895
Кварц плавный шероховатый	20	0,932

Продолжение табл. 3

Материалы	t в °С	ϵ
Кирпич красный шероховатый	20	0,80—0,93
» шамотный глазированный	1100	0,75
» огнеупорный, сильно излучающий	500—1000	0,8—0,9
Лак белый эмалевый на железной шероховатой пластине	40—100	0,8—0,95
Лак черный блестящий распыленный на железной пластине	20	0,87
Лак черный матовый	40—100	0,96—0,98
Шеллак черный блестящий на луженом железе	20	0,82
Шеллак черный матовый	75—150	0,91
Масляные краски различных цветов	100	0,92—0,96
Алюминиевая краска после нагрева до 325° С	150—300	0,35
Мрамор сероватый полированный	20	0,93
Стекло гладкое	20	0,94
Сажа, свечная копоть	100—270	0,95
Сажа с жидким стеклом	20—200	0,96
Сажа ламповая 0,075 мм и больше	20—400	0,95—0,97
Толь	20	0,91—0,93
Уголь очищенный (0,9% золы)	100—600	0,81—0,79
Угольная нить	1000—1400	0,52
Фарфор глазурованный	20	0,92
Штукатурка шероховатая известковая	10—90	0,91

Для большинства реальных тел ϵ не постоянно и зависит от температуры, с ростом которой ϵ увеличивается.

При нагреве гладких неокисленных полированных поверхностей, имеющих малую степень черноты, вследствие окисления поверхности в интервале температур 200—400° С величина ϵ резко увеличивается. Степень черноты шероховатых поверхностей во много раз больше степени черноты гладких полированных поверхностей.

Закон Кирхгофа. Согласно закону Кирхгофа, отношение излучательной способности E к поглощательной A для всех тел одинаково равно излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре и зависит только от температуры.

Закон Кирхгофа выводится из рассмотрения лучистого теплообмена между абсолютно черной и серой пластинами, помещенными на небольшом расстоянии друг от друга. Температура обеих пластин одинакова, и, следовательно, теплообмен между ними отсутствует.

Серая поверхность излучает E ккал/м²·ч энергии, которую черная поверхность полностью поглощает.

Черная поверхность излучает энергию в количестве E_0 . Падающая на серую поверхность, эта энергия частично, в количестве AE_0 , поглощается, а остальная часть энергии в количестве

$(1-A)E_0$ отражается и полностью поглощается черной поверхностью, т. е. баланс лучистого обмена можно записать следующим образом:

$$q = E - AE_0 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Как указывалось, при одинаковой температуре двух пластин $q=0$ и, следовательно, математическое выражение закона Кирхгофа может быть представлено в следующем виде:

$$E = AE_0 \text{ или } \frac{E}{A} = E_0.$$

Закон Ламберта (закон косинусов). Этот закон устанавливает, что лучеиспускательная способность в направлении под углом E_ϕ (направление излучения составляет с нормалью к излучаемой поверхности угол ϕ) и лучеиспускательная способность поверхности в нормальном направлении E_n связаны соотношением:

$$E_\phi = E_n \cos \phi.$$

Количество энергии, излучаемое элементом поверхности в направлении элемента dF , ориентированного под пространственным углом $d\Omega$ и ϕ , определяется по формуле

$$dQ_\phi = E_n d\Omega \cos \phi dF_1.$$

Величина излучения по нормали E_n может быть представлена в следующем виде:

$$E_n = \frac{\varepsilon}{\pi} 4,9 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

т. е. излучение по нормали в π раз меньше излучения по всем возможным направлениям. Тогда, подставив значение E_n , получим

$$dQ_\phi = \frac{\varepsilon}{\pi} 4,9 \left(\frac{T}{100} \right)^4 d\Omega dF_1 \cos \phi.$$

Это уравнение является основой для расчета лучистого теплообмена между поверхностями конечных размеров.

Расчетные формулы для теплообмена излучением. Общая формула для расчета теплообмена излучением между двумя непрозрачными телами на основании закона Стефана — Больцмана имеет вид

$$Q = \varepsilon_{пр} C_0 \phi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \text{ ккал/ч,}$$

где Q — количество тепла, переданное излучением от первого тела ко второму, в ккал/ч;

$\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы, учитывающая степень черноты обоих тел и их взаимное расположение;

C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный $4,96 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°K}^4$;

ϕ — средний угловой коэффициент или коэффициент облученности, учитывающий форму, размеры и взаимное расположение поверхностей;

T_1 и T_2 — абсолютные температуры первого и второго тела в °K;

F — поверхность теплообмена в м^2 .

При расчете промышленных печей чаще всего встречается следующее расположение тел:

а) две плоские параллельные неограниченные поверхности;

б) две замкнутые поверхности произвольной формы, охватывающие одна другую;

в) две плоские поверхности, произвольно расположенные в пространстве одна относительно другой.

Значения величин $\varepsilon_{пр}$, ϕ и F могут быть определены теоретически и экспериментально с использованием метода моделирования.

При теплообмене излучением между двумя плоскими параллельными поверхностями $\phi=1$ и

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1},$$

где ε_1 и ε_2 — степени черноты излучателя и нагреваемого тела.

При расчете теплового излучения между двумя замкнутыми поверхностями F_1 и F_2 , охватывающими одна другую ($F_1 < F_2$), $\phi=1$; F в формуле равна меньшей поверхности F_1 и приведенная степень черноты системы

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

где F_1 — поверхность охватываемого тела в м^2 ;
 F_2 — поверхность охватывающего тела в м^2 .

Передача тепла излучением при произвольном расположении тел в пространстве производится по вышеприведенной формуле с введением в нее дополнительного множителя — среднего углового коэффициента $\phi_{1,2}$

$$\phi_{1,2} = \iint_{F_1, F_2} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{r} dF_1 dF_2,$$

где F_1 и F_2 — поверхности излучения двух произвольно расположенных тел в m^2 ;

φ_1 и φ_2 — углы, образуемые направлением лучей с нормальными к поверхности излучающих тел;

r — расстояние между двумя взаимно излучающими телами в m .

Так как вычисление среднего углового коэффициента по уравнению с двойным интегралом вызывает значительные трудности, то его обычно определяют графическим путем или по упрощенным формулам, учитывающим взаимное расположение и форму излучающих поверхностей. Эти графики и формулы приведены в специальной литературе по вопросам лучистого теплообмена.

Теплообмен между двумя плоскими поверхностями, произвольно расположенными в пространстве, рассматривается ниже. Значения $\epsilon_{пр}$ могут быть определены и методом лучистого сальдо, предложенным Г. Л. Поляком. Сущность этого метода состоит в следующем.

Результативный транзит лучистой энергии сквозь внешнюю поверхность тела может быть рассчитан двумя способами (рис. 6).

Сквозь правую контрольную поверхность (пунктирная линия) от тела уходит испускаемая им собственная энергия $E_{соб}$ и отражаемая энергия $E_{отр}$. Сумма собственной и отражаемой энергий названа эффективной энергией $E_{эф}$. Через ту же контрольную поверхность в сторону тела проходит падающая энергия $E_{пад}$.

Если температура тела ниже температуры окружающей среды, то результативный транзит энергии равен превышению $E_{пад}$ над $E_{эф}$ и направлен в сторону тела. Это превышение, названное Г. Л. Поляком лучистым сальдо, является количеством тепла, полученным телом,

$$q = E_{пад} - E_{эф} \text{ или } E_{пад} = q + E_{эф}.$$

Аналогично лучистое сальдо через иную контрольную поверхность может быть выражено следующим образом:

$$q = E_{погл} - E_{соб} = AE_{пад} - E_{соб},$$

где $E_{погл}$ — поглощаемая телом энергия.

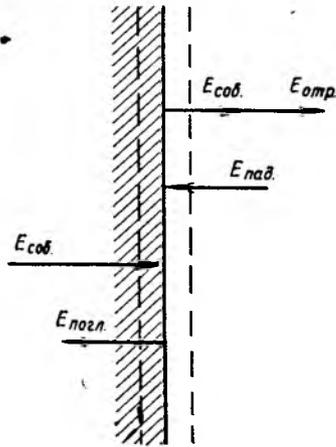


Рис. 6. Схема для расчета результивного транзита лучистой энергии

Подставляя в последнюю формулу величину $E_{пад}$, получим

$$q + E_{эф} = \frac{q + E_{соб}}{A}$$

и

$$E_{эф} = \frac{q + E_{соб}}{A} - q = \frac{q + E_{соб} - Aq}{A} = \frac{q(1 - A) + E_{соб}}{A} = E_0 + q \left(\frac{1}{A} - 1 \right).$$

В общем виде для тела, температура которого выше или ниже температуры окружающей среды, выражение для лучистого сальдо имеет вид:

$$E_{эф} = E_0 \pm q \left(\frac{1}{A} - 1 \right).$$

Пользуясь методом лучистого сальдо, легко решить, например, задачу о передаче тепла между двумя параллельными пластинами.

Падающая энергия на одну пластину равна всей эффективной энергии другой пластины, т. е.

$$q_{1,2} = E_{эф1} - E_{эф2}.$$

Далее получаем

$$q_{1,2} = E_{0,1} - q_1 \left(\frac{1}{A_1} - 1 \right) - E_{0,2} - q_2 \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right),$$

причем

$$q_1 = q_2 = q_{1,2},$$

откуда

$$q_{1,2} = \frac{E_{0,1} - E_{0,2}}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1}$$

или

$$A_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} - 1}.$$

Следует также указать на понятия о цветовой и яркостной температурах.

Цветовой температурой T_c называется температура абсолютно черного тела, имеющего для двух определенных спектральных участков то же отношение яркостей, что в данное тело, имеющее температуру T . Для всех металлов цветовая температура T_c выше, чем истинная температура тела T .

Яркостной температурой T_j называется температура абсолютно черного тела, имеющего ту же визуальную монохромати-

Значения средней эффективной длины пути луча S

Форма объема	Величина S
Сфера диаметром d	$0,6 d$
Куб со стороной a	$0,6 a$
Неограниченный цилиндр диаметром d	$0,9 d$
Слой газа между двумя параллельными пластинами толщиной δ	$1,8 \delta$

ческую яркость для определенной длины волны, что и данный излучатель, имеющий температуру T . Яркостная температура всегда меньше истинной температуры тела.

3. ПРОХОЖДЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ГАЗЫ

Инфракрасные лучи при прохождении через различные среды ослабевают. Это ослабление характеризуется уменьшением их мощности и происходит вследствие поглощения и рассеивания. При поглощении энергия инфракрасных лучей преобразуется в другие формы энергии, но главным образом в тепловую. При рассеивании инфракрасные лучи отклоняются в различные стороны, в результате чего только часть их проходит в первоначальном направлении.

Излучение газов. Сухой и чистый воздух практически прозрачен для теплового излучения. Присутствие многоатомных газов делает газовую среду полупрозрачной. Такова, например, газовая среда в рабочей камере печи. Здесь прозрачность газовой среды ослабляется из-за наличия в ней водяных паров и углекислоты.

Трех- и многоатомные газы могут поглощать, а при высоких температурах и излучать тепло. Большое практическое значение имеет излучение углекислоты (CO_2) и водяного пара (H_2O), содержащихся в продуктах сгорания.

Поглощение и испускание лучистой энергии газами имеет ярко выраженный селективный (избирательный) характер. Так, для углекислого газа (CO_2) обычно принимают три полосы поглощения, отвечающие следующим длинам волн: 2,36—3,02; 4,01—4,8; 12,5—16,5 μm . Для воды также принимают три полосы в следующих пределах длины волн: 2,24—3,27; 4,8—8,5; 12—25 μm . Селективность спектра газового излучения приводит к тому, что на него не распространяются некоторые законы излучения твердых тел.

Степень черноты газов зависит от их температуры, парциального давления и средней эффективной длины пути луча S , характеризующей размеры излучающего газового объема. Парциальные давления p_{CO_2} и $p_{\text{H}_2\text{O}}$ обычно известны из расчета горения топлива. Величина S может быть найдена по приближенной формуле А. С. Невского:

$$S = \eta \frac{4V}{F} m,$$

где V — объем полости, заполненной излучающим газом, в м^3 ;
 F — площадь стен, ограничивающих этот объем, в м^2 ;

η — коэффициент, учитывающий долю энергии излучаемой, которая доходит до стенок; величина этого коэффициента может быть принята равной 0,9.

Значения S , вычисленные при $\eta=0,9$, приведены в табл. 4.

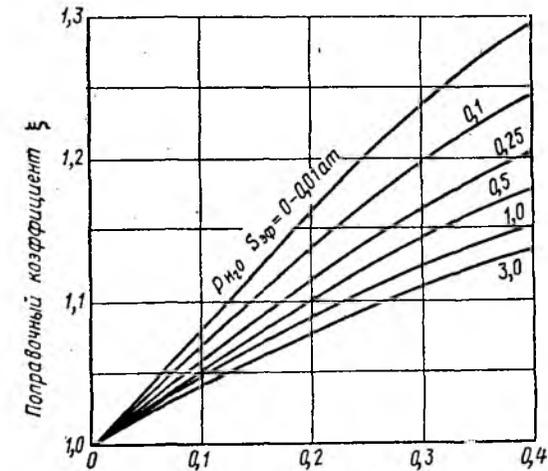


Рис. 7. Поправочный коэффициент ξ для получения степени черноты водяных паров ($\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \xi$)

В технических расчетах произведение pS (сила поглощения) принимается за один из аргументов при определении степени черноты излучающего газа. Теоретически степень черноты объемов, заполненных газом определенной температуры, в одинаковой мере зависит как от парциального давления излучающих газов, так и от эффективной длины пути луча. Это положение, справедливое для CO_2 , не соблюдается при излучении H_2O , для которого парциальное давление оказывает большее влияние на степень черноты, чем средняя длина пути луча. Для расчета излучения H_2O вводится поправочный коэффициент ξ , величина которого зависит от $p_{\text{H}_2\text{O}}$ и определяется по рис. 7. Для

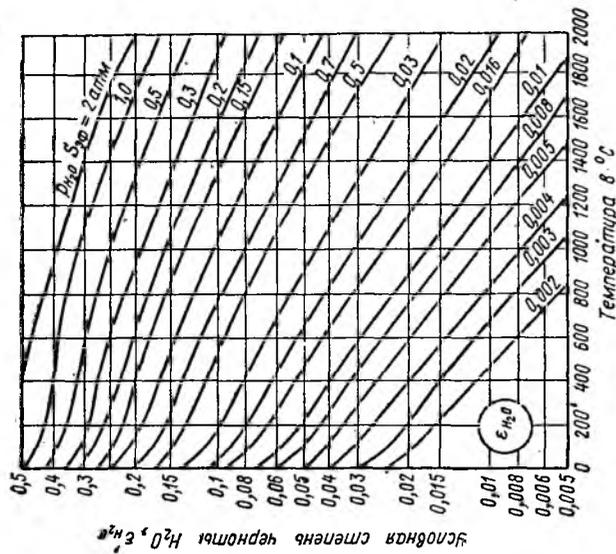


Рис. 9. Условная степень черноты излучения водяных паров без поправки на их парциальное давление

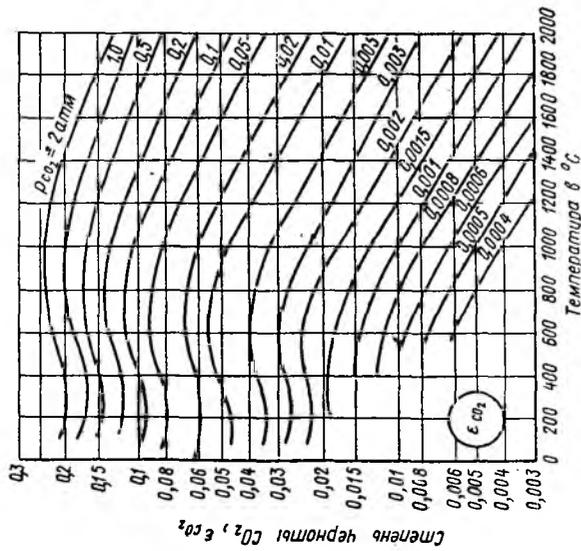


Рис. 8. Степень черноты излучения углекислого газа

получения действительной степени черноты H_2O условную степень черноты ϵ'_{H_2O} , найденную на рис. 9, умножают на коэффициент ξ , т. е.

$$\epsilon_{H_2O} = \xi \epsilon'_{H_2O}$$

Степени черноты ϵ_{CO_2} и ϵ'_{H_2O} определяются по графикам рис. 8 и 9, составленным В. Н. Тимофеевым и Э. С. Карасиной в зависимости от p_{CO_2} , p_{H_2O} и температуры газов.

Степень черноты газов тогда составит:

$$\epsilon_r = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O}$$

Г. Л. Поляк предложил формулу для определения теплового потока при излучении газов на твердую поверхность с учетом многократных поглощений, отражений и пропусканий лучистых потоков:

$$q = \frac{4,96}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \left[\epsilon_r \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right],$$

где ϵ_c — степень черноты газов при температуре поверхности стены T_c ;

ϵ_r и T_r — степень черноты и температура газов.

При однократном поглощении выражение для суммарного теплового потока принимает вид:

$$q = 4,96 \epsilon \left[\epsilon_r \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \epsilon_c \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right].$$

Если T_r незначительно больше T_c , последнюю формулу можно записать в следующем виде:

$$q = 4,96 \epsilon \epsilon_r \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right].$$

При приближенных расчетах А. Шак рекомендует пользоваться следующими выражениями для степени черноты трехатомных газов:

1) степень черноты газов при их температуре T_r

$$\epsilon_r \approx 0,715 \sqrt[3]{\frac{p_{RO_2} s}{0,01 T_r}} + 7,15 \frac{p_{H_2O}^{0,8} s^{0,6}}{0,01 T_r};$$

2) степень черноты газов при температуре стенки T_c

$$\epsilon_c \approx 0,715 \sqrt[3]{\frac{p_{RO_2} s}{0,01 T_c}} + 7,15 \frac{p_{H_2O}^{0,8} s^{0,6}}{0,01 T_c}.$$

Если температура продуктов горения T_r соизмерима с температурой поверхности T_c , то при пользовании выражением

ем, вместо ε_r вводится среднее значение степени черноты газов $\bar{\varepsilon}_r$ в интервале температур T_r и T_c , определяемое по выражению

$$\bar{\varepsilon}_r = \frac{\varepsilon_r (0,01 T_r)^4 - \varepsilon_c (0,01 T_c)^4}{(0,01 T_r)^4 - (0,01 T_c)^4}.$$

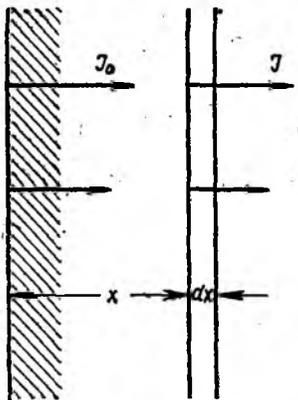


Рис. 10. Схема для вывода формулы, выражающей закон Бугера

В печах излучение газов всегда сопровождается конвективной теплоотдачей к твердым поверхностям. При этом в зависимости от температур T_r и T_c и характера движения газов соотношение между обоими видами теплопередачи может существенно изменяться, так как излучение твердых тел и газов и конвекция подчиняются различным законам. Это приводит к известному усложнению расчетов теплообмена и к необходимости упрощения явлений. Такое упрощение выражается в том, что рассматривают суммарное значение коэффициента теплоотдачи от газов к поверхности стенки:

$$\alpha = \alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением равен:

$$\alpha_{\text{изл}} = C \frac{(0,01 T_1)^4 - (0,01 T_2)^4}{t_1 - t_2}.$$

Общий тепловой поток составит:

$$q = \alpha (t_1 - t_2).$$

Часто при малых значениях $q_{\text{конв}}$ вводят коэффициент $x > 1$, т. е. $q = x q_{\text{изл}}$ с последующей проверкой этого коэффициента.

Закон Бугера. Пусть плотность потока энергии (рис. 10), входящей в поглощающий слой (полосу) I_0 . На расстоянии x от поверхности она равна I . Тогда

$$dI = -b_\lambda I dx,$$

где b_λ — коэффициент ослабления или поглощения луча в m^{-1} .

Знак минус показывает, что в положительном направлении оси x величина dI отрицательна. Коэффициент характеризует способность среды ослаблять поток излучения, численно равной доле потока, поглощенного и рассеянного в единичном объеме вещества и зависящей от длины волны падающего потока излучения.

В результате интегрирования получается

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -b_\lambda \int_0^x dx,$$

где x — длина пути излучения в среде.

Эта формула выражает закон Бугера. Она является приближенной, но благодаря своей простоте удобна для расчетов.

Коэффициент пропускания плоского слоя полупрозрачной среды

$$\tau = \frac{I}{I_0} = e^{-b_\lambda x},$$

где I — поток излучения, прошедшего через толщину x среды;
 I_0 — поток падающего излучения;
 e — основание натуральных логарифмов.

Кроме показателя ослабления к оптическим характеристикам среды относятся пропускание (или прозрачность), а также оптическая плотность.

Коэффициент поглощения A выражается формулой

$$A = I_0 - I = I_0 (1 - e^{-b_\lambda x}).$$

На основании закона Кирхгофа получаем, что степень черноты газа $\varepsilon_\lambda = A_\lambda$. Она изменяется в зависимости от толщины слоя по экспонентному закону, т. е.

$$\varepsilon_\lambda = A_\lambda = I_0 - I = I_0 (1 - e^{-b_\lambda x}) = I_0 (1 - e^{-k_\lambda p S}).$$

В приведенном выше выражении коэффициент поглощения $b_\lambda = k_\lambda p$, так как для газовой смеси коэффициент поглощения какой-нибудь составной части смеси должен входить в расчет такой доли, которая соответствует ее парциальному давлению p ; величина k_λ зависит только от вида газа и от длины волны.

При $x = \infty$ $\varepsilon_\lambda = A_\lambda = 1$, т. е. излучение бесконечно толстого слоя газа является черным.

Закон Кирхгофа верен и для твердых тел, излучение которых является поверхностным явлением. Следовательно, чистота, загрязненность и покрытие краской оказывают большое влияние на поглощательные и лучеиспускающие свойства твердых тел.

Оптическая плотность D используется при расчетах пропускания атмосферой и фильтрами потока излучения и является десятичным логарифмом пропускания, взятым с обратным знаком:

$$D = k_n l,$$

где k_n — показатель поглощения, равный 0,434 k , и следовательно

$$D = 0,434 kl.$$

Изменение поглощения лучистой энергии одним и тем же материалом в зависимости от длины волны представляет собой сложное явление. В результате изучения такого явления ученые научились подбирать оптические материалы, пропускающие или поглощающие инфракрасные лучи. Такие материалы служат либо окнами, когда необходимо максимальное пропускание, либо фильтрами, когда добиваются выделения нужного участка спектра излучения и поглощения мешающих излучений.

В табл. 5 приведены данные о некоторых из этих материалов.

Таблица 5

Оптические материалы инфракрасной аппаратуры

Материал	Практический предел пропускания в мк	Пропускание в %		Показатель преломления в %		Коэффициент теплового расширения 10 ⁻⁶ °С	Плотность в г/см ³	Точка плавления в °С
		при 2,2 мк	при 4,3 мк	при 2,2 мк	при 4,3 мк			
Специальные оптические стекла	2,7	96—98	—	1,5—1,7	—	4—10	2,3—4,8	1400
Плавленый кварц	4,5	96	40	1,43	1,37	0,55	2,2	1667
Техсернистый мышьяк	12	96	96	2,38	2,35	26	3,2	196
Кремний	15	98	98	3,45	3,43	4,2	2,33	1420
Сапфир (Al ₂ O ₃)	5,5	94	94	1,73	1,68	6,7	3,98	2030
Периклаз (MgO)	6,8	89	94	1,71	1,66	13	3,59	2800
Германий	15	96	96	4,08	4,02	6	5,32	958
Хлористое серебро	25	80	—	2,01	2	30	5,53	458
Бромистый калий	27	92	—	1,54	1,53	41	2,75	728

Подбирая тот или иной материал для окон и фильтров, учитывают конкретные задачи, которые придется выполнять с помощью инфракрасной аппаратуры.

Пропускание атмосферой инфракрасных излучений в значительной мере зависит от количества водяных паров и капель воды в воздухе, а также углекислоты. Ослабление излучений в атмосфере обуславливается процессами рассеяния, которые находятся в зависимости от характера, размеров и статического распределения рассеивающих частиц в атмосфере.

Инфракрасные лучи поглощаются и рассеиваются в атмосфере молекулами атмосферных газов, а также твердыми частицами и каплями воды (туманами).

Наиболее сильными полосами поглощения водяного пара являются следующие участки длин волн (цифры указывают цент-

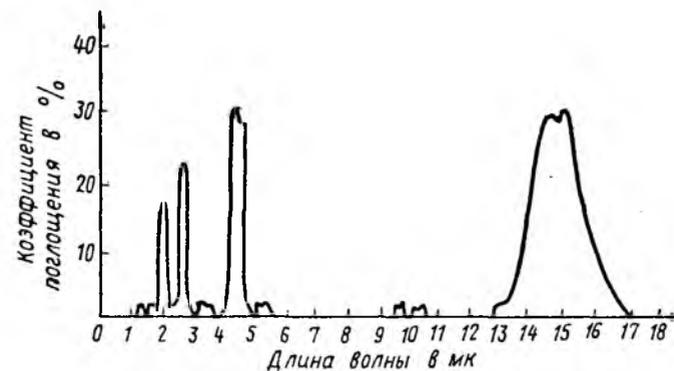


Рис. 11. Полосы поглощения углекислоты в атмосфере

ры полос): 0,95; 1,13; 1,38; 1,46; 1,87; 2,66; 3,15; 6,26; 11,7; 12,6; 13,5; 14,3 мк.

В этих участках спектра энергия инфракрасных лучей, проходящих через атмосферу, поглощается в весьма значительной

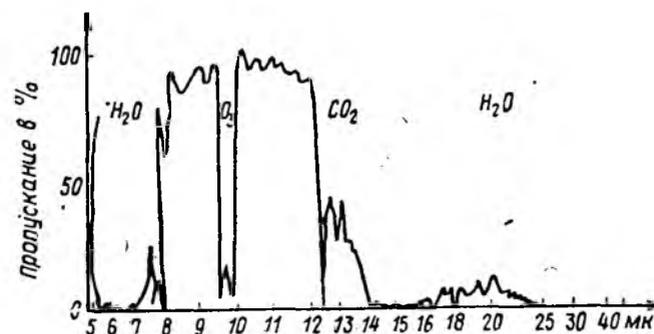


Рис. 12. Спектральное пропускание атмосферы

степени. Наряду с полосами поглощения в водяном паре имеются полосы пропускания, в которых энергия инфракрасных лучей проходит без заметного поглощения.

Углекислота характеризуется интенсивным поглощением при длинах волн примерно 2—2,6, 4,3 и особенно от 12,8 до 17,3 мк (рис. 11). Поглощающее действие углекислоты в первых двух участках спектра можно не учитывать, так как содержание ее

в воздухе по сравнению с содержанием водяного пара невелико.

Кривая на рис. 12 получена для определенной толщины слоя воздуха без пыли и тумана и показывает полосы пропускания излучения. Основная часть полос поглощения характеризуется наличием в атмосфере паров воды и углекислого газа и значительно меньше — наличием озона.

Согласно теоретическим исследованиям, рассеяние лучистой энергии частицами, размеры которых малы по сравнению с длиной ее волны, обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Следовательно, с уменьшением волны рассеяние увеличивается. Рассеиваемую такими частицами энергию можно определить через коэффициент рассеяния ϵ , характеризующий степень ослабления радиации в единичной толще атмосферы в результате взаимодействия потока излучения с молекулами среды, вызывающего перераспределение энергии,

$$\epsilon = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{2N\lambda^4} (1 + \cos^2 \varphi),$$

где n — показатель преломления вещества частиц;
 N — число частиц в единице объема;
 φ — угол между направлениями падающего луча и рассеянного;
 λ — длина волны.

Коэффициент рассеяния зависит от угла φ и от свойств среды. Из приведенной формулы следует, что при $\varphi = 0$ и 180° рассеяние максимально.

Общее ослабление энергии I инфракрасных лучей в слое атмосферы толщиной x , вызываемое рассеянием энергии и поглощением ее, характеризуется коэффициентом ослабления k .

Коэффициент ослабления представляет собой величину, получающуюся в результате сложения коэффициентов рассеяния и поглощения и имеет размерность, обратную длине, например $1/м$.

Для определения коэффициента ослабления может служить формула

$$I = I_0 e^{-kx} = I_0 e^{-(\alpha - \epsilon)x},$$

где I_0 — энергия излучения до прохождения слоя толщиной x ;
 I — энергия излучения после прохождения слоя;
 e — основание натуральных логарифмов.

Более подробно свойства инфракрасного излучения освещены в главах III и IV при рассмотрении вопросов практического применения его для различных целей тепловой обработки материалов.

ГАЗОГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1. ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ГАЗА В ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СПЕКТР И ЭПЮРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

В последнее время в Советском Союзе и за рубежом стали применять беспламенные газогорелочные устройства инфракрасного излучения.

При проектировании газовых инфракрасных излучателей, можно выбрать два конструктивных решения: 1) металлические листы нагреваются снаружи маленькими газовыми факелами или посредством потока горячих отработанных газов. При этом листы в соответствии с их размерами, температурой и состоянием поверхности создают диффузное инфракрасное излучение; 2) стехиометрическую газоздушную смесь пропускают либо через пористые или перфорированные пластины из керамического материала, либо через металлические сетки и сжигают ее на поверхности последних.

В первом случае продукты сгорания не соприкасаются с материалами, нагреваемыми с помощью инфракрасного излучения в изолированном пространстве печи (например, в туннеле); при втором — горячие продукты сгорания поступают в сушильное пространство, т. е. соприкасаются с нагреваемыми материалами.

Отличительные особенности беспламенных излучающих инжекционных горелок по сравнению с факельными заключаются в следующем:

- 1) значительное количество тепла, выделяемого этими горелками, передается излучением;
- 2) газ сгорает в тонком слое на поверхности излучающей насадки (без видимого факела);
- 3) газогорелочные устройства инжектируют в качестве первичного весь необходимый для сгорания воздух;
- 4) продукты сгорания указанных газогорелочных устройств содержат значительно меньшее количество окиси углерода, чем продукты сгорания факельных горелок;
- 5) применение излучающих газогорелочных устройств для технологических нужд позволяет в несколько раз сократить продолжительность технологических операций, улучшить качество обрабатываемого продукта, уменьшить количество потребляемой энергии, упростить и автоматизировать пуск-остановку агрегата и его регулирование. Однако следует иметь в виду, что для каждого вида продукции должен быть разработан свой особый технологический режим обработки инфракрасными лучами. Кроме того, необходимо иметь в виду, что прежде чем исполь-

зовать газогорелочные устройства в промышленности, необходимо в каждом отдельном случае производить технико-экономический расчет для определения пригодности данного способа нагрева.

Принципиальная схема беспламенной излучающей горелки показана на рис. 13. Газ, выйдя из форсунки, инжектирует воздух. Инжектор-смеситель рассчитывается таким образом, чтобы при заданном гидравлическом сопротивлении горелочного (излучающего) насадка и давлении газа перед форсункой количество первичного воздуха находилось в пределах 1,08—1,1 от

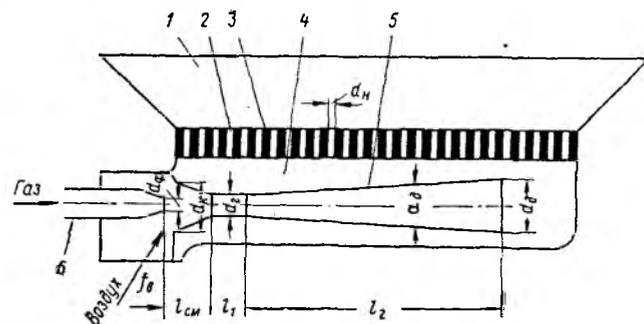


Рис. 13. Принципиальная схема беспламенной излучающей горелки

1 — рефлектор; 2 — каналы в керамической насадке; 3 — насадка; 4 — распределительная коробка; 5 — инжектор-смеситель; 6 — форсунка

теоретически необходимого. Газовоздушная смесь, образующаяся в инжекторе горелки, поступает в распределительную коробку под давлением 0,15—0,2 мм вод. ст. Далее проходит через керамический насадок, состоящий из огнеупорных плиток с большим количеством сквозных либо цилиндрических, либо конических каналов малого диаметра или ступенчатых каналов двух диаметров: вначале (по ходу смеси) меньшего и на выходе большего и сгорает у наружной поверхности плиток.

Близкий к стехиометрическому состав газовоздушной смеси, хорошее перемешивание газа с воздухом и небольшая скорость выхода смеси обеспечивает возможность сгорания ее на поверхности насадка в тонком слое. Однако незначительное отклонение от указанных пределов коэффициента избытка воздуха резко снижает эффект беспламенного сжигания газа. При увеличенном подсосе первичного воздуха температура насадка падает, а излучательная способность газогорелочного устройства понижается. При пониженном подсосе появляются языки пламени, происходит неполнота сгорания, возникает необходимость подвода вторичного воздуха.

В настоящее время имеется большое количество конструкций газогорелочных устройств инфракрасного излучения отечественного производства и зарубежных фирм.

В отечественных горелках в большинстве случаев применяется насадок (рис. 14) из керамических плиток размером 69 × 47 мм и толщиной 12 мм, соединенных между собой специальной склеивающей массой. На каждой плитке размещается около 700 цилиндрических сквозных каналов диаметром 1—1,5 мм. Размещение каналов показано на рисунке. Суммарное сечение каналов, составляющее 40—45% всей рабочей поверхности плитки, обеспечивает малые гидравлические сопротивления насадка и высокое теплонапряжение поверхности¹.

Во избежание проскока пламени диаметр цилиндрических каналов и меньший диаметр ступенчатых или конусных каналов делают менее критического. В случае цилиндрических каналов горение сосредоточивается близ поверхности насадка, а при ступенчатых отверстиях оно сосредоточивается в расширенной части канала внутри плитки.

Следовательно, принятый диаметр отверстий насадка 1,5 мм для природного и 1—1,2 мм для сжиженного газов меньше критического и это позволяет избежать проскока пламени внутрь горелки.

При работе на сжиженном газе горелки более устойчивы к отрыву и менее устойчивы к проскоку, чем при работе на природном газе, так как скорость распространения пламени для сжиженного газа выше, чем для природного.

Керамические плитки могут быть разнообразной формы и размеров в зависимости от назначения и от тепловой нагрузки горелки. Оптимальная температура излучающей поверхности горелки равна при керамической насадке 800—950° С. На рис. 15 изображен график, показывающий зависимость температуры излучающей поверхности горелки от расхода природного газа (площадь излучающей поверхности 240 см²). Исследование температурных режимов керамической огневой насадки показало, что максимальная температура керамических плиток достигается при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$.

¹ Коэффициент гидравлического сопротивления плитки при сгорании газа в 2,25—2,75 раза больше, чем при продувке холодным воздухом.

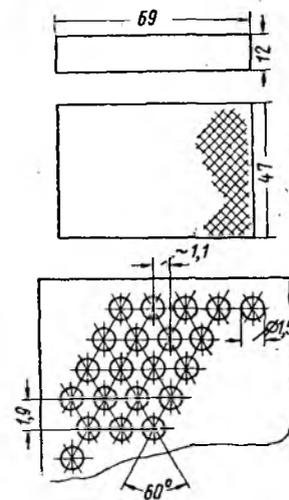


Рис. 14. Размещение отверстий на поверхности насадки

Состав масс для изготовления керамических плиток и их основные физико-технические показатели

Тип смеси	Состав компонентов в %							Влажность при прессовании в %	Температура обжига в °С	Общая усадка в %	Объемный вес в кг/дм ³	σ на изгиб в кг/см ²	Коэффициент теплопроводности в ккал/м·град·ч
	Тальк	глина латгнеская	анатомит	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	асбест	лигнин (сверх 100%)						
I	30	65	—	5	—	—	50	35	1040	12,5	0,93	16	0,53
II	30	45	20	—	5	—	20	35	960	9,5	1,24	27	0,58
III	30	55	—	5	—	10	15	26	960	6	1,35	23,5	0,54

При сжигании газозвушной смеси на поверхности плоских перфорированных керамических плиток наблюдается неравномерность нагревания их поверхности. Появление зон с различной температурой нагрева объясняется различием в толщине перемычек между отверстиями и различием диаметров отверстий. В представленном на рисунке насадке сгорание газозвушной смеси происходит на поверхности керамических пирамидок или конусов. При этом возрастает площадь радирующей поверхности, уменьшается или значительно неравномерность нагрева керамики, повышается полнота сгорания и доля тепла, передаваемого в виде лучистой энергии.

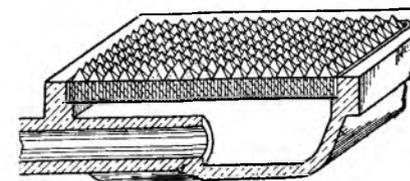


Рис. 17. Внешний вид горелочного насадка с пирамидальными выступами на излучающей поверхности

Проведенные испытания показывают, что керамические насадки долговечны и не растрескиваются под действием резких изменений температуры. При увлажнении раскаленная поверхность насадка резко охлаждается, а после испарения воды вновь быстро разогревается, оставаясь при этом неповрежденной.

Небольшая теплоаккумулирующая способность излучающей поверхности насадка способствует быстрому разогреву его, т. е. горелка может работать как безынерционный нагревательный прибор.

Для интенсификации процесса сжигания газа и выравнивания температуры по поверхности керамического насадка над ним (на расстоянии 8—10 мм) устанавливается металлическая сетка из жароупорного металла. Сетка используется также в качестве стабилизатора горения при небольшом обдувании на-

На рис. 16 показано распределение температур по высоте плитки толщиной 12 мм, изготовленной из пористой огнеупорной массы. Разность температур огневой поверхности и тыльной стороны плитки составляет примерно 780°С. При коэффициенте избытка воздуха 1,05 и расхода природного газа 80 л/ч температура огневой поверхности ~970°С.

Керамические плитки должны быть механически прочными, с низким коэффициентом теплопроводности, малым гидравлическим сопротивлением, небольшим объемным весом и термостойкими. Живое сечение отверстий для подачи газозвушной смеси должно составлять не менее 50% излучающей поверхности плитки.

Керамические плитки изготавливаются из следующих

составов (в весовых %): глина часов-ярская — 45%; каолин — 25%; тальк — 25%; окись хрома — 5%.

К керамическим плиткам предъявляются следующие технические требования: предел прочности при изгибе должен составлять не менее 35 кгс/см², коэффициент теплопроводности 0,5 ккал/ч·м·град и объемный вес 1 г/см³.

Керамические плитки должны выдерживать резкие температурные колебания. При попадании на насадок работающей горелки холодной воды блок керамических плиток не должен растрескиваться.

Для изготовления плиток могут применяться составы, разработанные АКХ им. К. Д. Памфилова и Государственным исследовательским керамическим институтом (табл. 6).

На рис. 17 представлен горелочный насадок к газовым горелкам инфракрасного излучения с пирамидальными выступами на его излучающей поверхности.

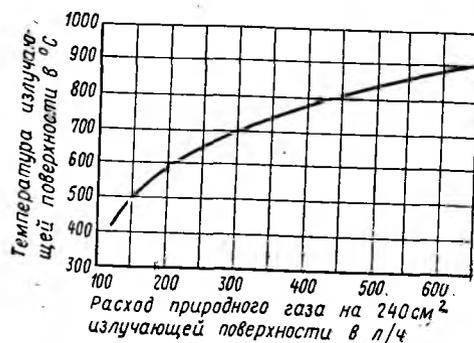


Рис. 15. Зависимость температуры излучающей поверхности горелки от расхода природного газа

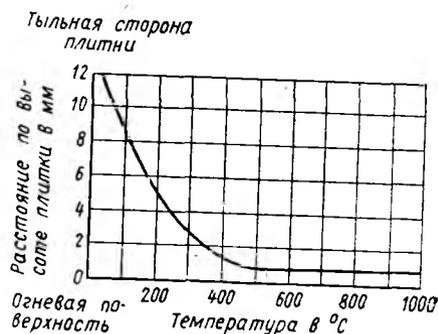


Рис. 16. Распределение температуры по высоте плитки

садка. Кроме того, сетка повышает температуру насадка на $100-130^{\circ}\text{C}$.

В условиях эксплуатации горелок инфракрасного излучения на открытом воздухе требуется высокая их ветроустойчивость. Это может быть достигнуто следующим образом:

- 1) созданием равных по величине давлений перед керамическим насадком и во всасывающей камере при обдувании горелки;

- 2) применением керамических плиток с отверстиями диаметром $0,8-1\text{ мм}$;

- 3) установкой специальных ветрогасящих перегородок и сеток, располагаемых перед горелочным насадком;

- 4) повышением давления газа перед горелкой;

- 5) установкой перед горелочным насадком экрана с максимальной пропускательной способностью инфракрасного излучения.

Это решение следует считать самым правильным, так как экран защищает горелочный насадок от охлаждения и, следовательно, препятствует снижению мощности излучения.

При разогреве плитки температура газовой смеси может повыситься настолько, что станет возможным проскок пламени даже через отверстия с диаметром меньше критического. Поэтому плитки должны изготавливаться из малотеплопроводного материала.

Проскок пламени возникает, когда хотя бы в одной точке фронта пламени скорость распространения пламени превышает скорость истечения газовой смеси. Возникновение проскока пламени зависит от характеристики горючего газа, состава, температуры и расхода газовой смеси, диаметра огневого отверстия и характера распределения скоростей в выходном отверстии. Некоторое влияние может оказывать также и форма огневого канала.

При нормальном расходе газа температура огневой поверхности не превышает 900°C и горение происходит над поверхностью плиток. При горении видны раскаленные перегородки, окаймляющие темные отверстия. Поверхность плитки имеет красновато-оранжевый цвет.

При увеличенном расходе газа температура поверхности плитки повышается и меняется расположение зон горения. Отдельные участки плитки раскаляются до белого цвета (температура их составляет $1050-1100^{\circ}\text{C}$). Смесь подогревается в выходной 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 $950-1000^{\circ}\text{C}$. Так как температура поверхности плитки достигает температуры внутренних стенок канала, то отверстия в ней трудно раз-

личить, вся плитка как бы покрывается огненной пеной (плазмой). При дальнейшем разогреве плитки зона горения все дальше продвигается в глубь каналов, перегородки между ними темнеют и видны раскаленные светящиеся отверстия. В этом случае происходит проскок пламени внутрь смесительной камеры горелки.

Проведенные исследования устойчивости горения по отношению к проскоку пламени в горелках инфракрасного излучения позволяют рекомендовать для них керамические плитки с диаметром отверстий $1,5\text{ мм}$ при работе на природном газе и $1-1,2\text{ мм}$ на сжиженном. Эти исследования позволили также установить новые закономерности возникновения проскока пламени, отличные от известных для обычных инжекционных горелок. Характерным является увеличение вероятности проскока с повышением расхода газа. Проскок может возникать даже при критических и еще меньших диаметрах огневых отверстий.

Это положение подтверждается также опытами сжигания в горелках инфракрасного излучения коксового газа. Поэтому следует рекомендовать для горелок на коксовом газе перфорированные керамические плитки с диаметром отверстий $0,85\text{ мм}$. Конусообразные каналы с расширенным выходом увеличивают, а с суженным уменьшают область проскока пламени по сравнению с цилиндрическими каналами того же сечения.

Нагреваемые инфракрасными горелками изделия оказывают некоторое влияние на огневой насадок, повышая его температуру за счет обратного излучения. С повышением температуры облучаемой поверхности и с уменьшением расстояния между ней и излучающей горелкой вероятность проскока пламени внутрь смесительной камеры увеличивается. Отрицательное влияние обратного излучения нагреваемого предмета на устойчивость работы горелок инфракрасного излучения при низкотемпературной обработке материала сказываться не будет, например, в процессах сушки, которые происходят при относительно низких температурах, не превышающих 200°C .

При установке металлических сеток над керамическими насадками устойчивость горения горелок инфракрасного излучения в отношении проскока пламени понижается. Поэтому при использовании этих сеток для повышения ветроустойчивости горелок и выравнивания температуры излучающей поверхности следует несколько уменьшать номинальный расход газа. Как известно, сетка служит одновременно вторичным излучателем и наличие ее позволяет увеличить коэффициент излучения горелки. Наибольшее количество излучаемого тепла передается при наличии над керамическими плитками металлических сеток — стабилизаторов — из хромоникелевой проволоки. Оптимальная характеристика сеток: диаметр проволоки $1,2-1,3\text{ мм}$; размер стороны квадратной ячейки $2,3-2,5$; живое сечение сетки $0,4-0,5\text{ мм}$ ($40-50\%$).

Исследованиями установлено, что для стабилизации горения, повышения и выравнивания температуры излучающего насадка целесообразно применять ребристую поверхность на огневой стороне излучающей панели. В этом случае сетка-стабилизатор может иметь живое сечение больше 0,5.

На работу инжекционных газогорелочных устройств инфракрасного излучения оказывает влияние угол наклона излучающего насадка по отношению к горизонту. Изменяя угол наклона

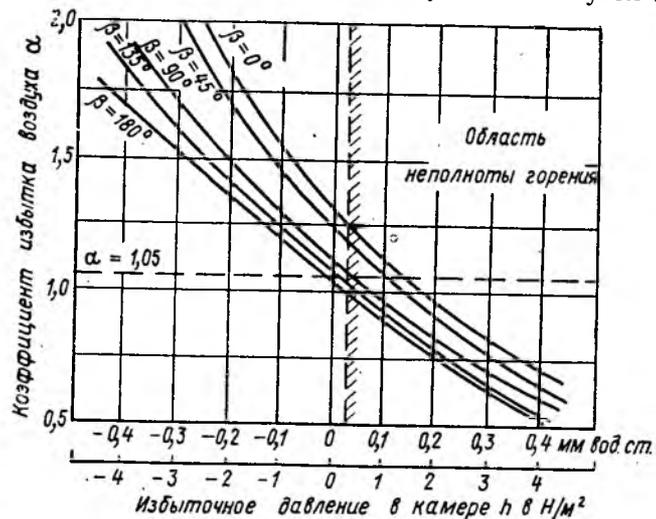


Рис. 18. График зависимости коэффициента избытка воздуха α от избыточного давления в смесительной камере

насадка, можно до некоторой степени регулировать давление в камере смешения горелки, а также изменять коэффициент инжекции.

График зависимости коэффициента избытка воздуха α от избыточного давления в смесительной камере горелки h приведен на рис. 18.

График показывает, что если при потолочном (горизонтальном) расположении горелок ($\beta = 180^\circ$) и $h = 0$ мм вод. ст. коэффициент первичного воздуха горелки имеет оптимальную величину $\alpha'_r = \alpha = 1,05$, то с уменьшением угла установки горелки значение α'_r растет и достигает при $\beta = 0^\circ$ величины 1,3.

Такой характер зависимости коэффициента первичного воздуха горелки от угла β объясняется действием самотяги, образующейся по высоте огневых каналов керамических плиток излучающего насадка и вызывающей уменьшение гидравлического сопротивления последнего по мере уменьшения угла установки горелки.

Таким образом, критерием оценки правильности расчета газовых инжекционных горелок инфракрасного излучения низкого давления следует считать коэффициент первичного воздуха, оптимальная величина которого должна обеспечиваться при горизонтальном их расположении ($\beta = 180^\circ$).

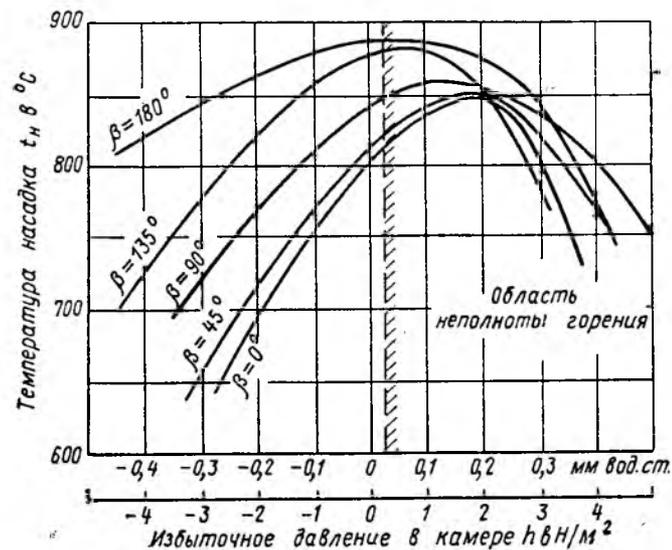


Рис. 19. График зависимости температуры излучающего насадка горелки от избыточного давления в камере

На графике (рис. 19) показана зависимость температуры t_n насадка от избыточного давления h в смесительной камере горелки, а на рис. 20 — зависимость расхода газа горелкой от угла ее расположения по отношению к горизонтальной плоскости. Многочисленные результаты испытаний ограничены на графике двумя кривыми.

Перспективным является изготовление излучающего огневого насадка из металлических жаропрочных сеток. Схема горелки с таким насадком приведена на рис. 21.

Принцип действия этой горелки тот же, что и с керамическим насадком (см. рис. 13).

Подготовленная в смесительной камере для горения однородная по составу газозвушная смесь выходит в зону горения через один или несколько рядов металлических сеток. Сгорание газа происходит между последней (наружной) и предпоследней сетками, расположенными на небольшом расстоянии друг от друга. Сетки раскаляются до высокой температуры и становятся источником излучения.

Основной задачей при разработке инфракрасных горелок с металлическими сетчатыми насадками является подбор сеток, обеспечивающих устойчивость горения при достаточно высокой температуре их.

Правильный выбор конструкции и числа металлических сеток в горелках способствует подогреву газовой смеси до температуры, близкой к температуре в зоне горения, стабильности процесса горения и высокому выходу лучистой энергии.

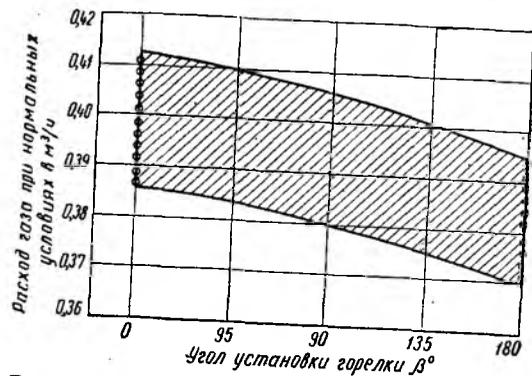


Рис. 20. Зависимость расхода газа горелкой инфракрасного излучения от угла ее установки

Число сеток и комбинация их могут быть различными. Однако для надежности работы горелок количество их должно быть не менее двух, а диаметр ячеек нижнего ряда сеток не превышать критического. В зависимости от общего гидравлического сопротивления сеток напор перед горелкой определяется расчетом или подбирается экспериментально.

Кроме описанных выше типов инфракрасных излучателей применяются также чаше- и кольцеобразные, трубчатые и панельные с насадком из керамики и металлических листов. Чаше- и кольцеобразные излучатели используют для нагрева деталей на конвейерных линиях или, komponуя их в группы, для образования излучающих панелей значительной площади.

Большое распространение за рубежом получили газовые инфракрасные излучатели с панелями пористой керамики.

Через поры керамической панели проходит газ, предварительно смешанный с воздухом, и сжигается на ее поверхности. Поверхность панели активизирована окислами металлов для каталитического горения газа. Иногда к этим материалам прибавляют так называемые промоторы, которые усиливают действие катализаторов. На активизированной поверхности панели происхо-

дит полное сгорание газа, причем даже при сравнительно низкой температуре газ сгорает со скоростью, которая в обычных условиях соответствует высокой температуре. При этих условиях даже кратковременное соприкосновение газовой смеси с раскаленным огнеупорным материалом создает возможность сжигать газы с различной скоростью распространения пламени. Большое значение имеют состав и зернистость материала панели, так как зона горения высотой около 5 мм должна стабилизироваться на поверхности панели. Температура панели может достигать 950—1000°С. Сжигание газа в панели происходит в основном так же, как и в других беспламенных излучающих горелках. Смесь газа с воздухом подводится под панель — головку горелки, где создается давление, необходимое для преодоления гидравлического сопротивления панели и ускорения движения смеси до выходной скорости. Газовоздушная смесь, выходя через поры панели, сгорает на поверхности. При высокой скорости сжигания газа пламя невидимо. При изменении давления смеси газа под головкой тепловая нагрузка горелки соответственно понижается или повышается. Однако понижение давления смеси и уменьшение тепловой нагрузки в некоторых пределах не вызывают неустойчивости горения или проскока пламени. Проскок пламени возникает лишь в результате значительного повышения тепловой нагрузки. Сжигание газа обычно сопровождается слабым шипением.

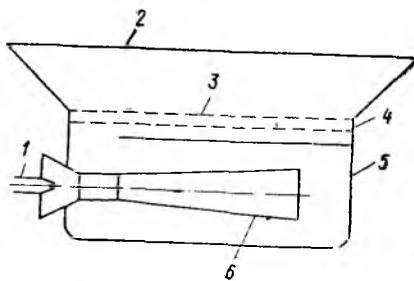


Рис. 21. Схема газовой горелки инфракрасного излучения с металлическим сетчатым излучателем

1 — форсунка; 2 — рефлектор; 3 — сетка насадка; 4 — предохранительная сетка; 5 — корпус; 6 — диффузор

дит полное сгорание газа, причем даже при сравнительно низкой температуре газ сгорает со скоростью, которая в обычных условиях соответствует высокой температуре. При этих условиях даже кратковременное соприкосновение газовой смеси с раскаленным огнеупорным материалом создает возможность сжигать газы с различной скоростью распространения пламени. Большое значение имеют состав и зернистость материала панели, так как зона горения высотой около 5 мм должна стабилизироваться на поверхности панели. Температура панели может достигать 950—1000°С. Сжигание газа в панели происходит в основном так же, как и в других беспламенных излучающих горелках. Смесь газа с воздухом подводится под панель — головку горелки, где создается давление, необходимое для преодоления гидравлического сопротивления панели и ускорения движения смеси до выходной скорости. Газовоздушная смесь, выходя через поры панели, сгорает на поверхности. При высокой скорости сжигания газа пламя невидимо. При изменении давления смеси газа под головкой тепловая нагрузка горелки соответственно понижается или повышается. Однако понижение давления смеси и уменьшение тепловой нагрузки в некоторых пределах не вызывают неустойчивости горения или проскока пламени. Проскок пламени возникает лишь в результате значительного повышения тепловой нагрузки. Сжигание газа обычно сопровождается слабым шипением.

Трубчатые излучатели состоят из керамических труб или металлических (жаропрочных), раскаленных изнутри продуктами сгорания газа. Трубы служат обогревательными элементами в различных печах, где нельзя допускать соприкосновения материала с отходящими продуктами сгорания. Нагревательные керамические трубы можно применять для температур выше 1000°С.

При изменениях статического давления внутри труб отходящие газы не проникают в рабочее пространство печи. Преимуществами трубчатых излучателей являются малая тепловая аккумуляция, быстрый разогрев, относительно высокий к. п. д. и минимальный объем ремонтных работ. В последнее время для трубчатых излучателей стали применяться металлические трубы из жаропрочных сталей, из которых составляются панели печей с защитной атмосферой. Инфракрасные излучатели с панелями из металлических листов, нагреваемых продуктами сгорания до температуры 200—500°С, называют «черными» или «темными». Их широко используют в туннельных сушилках. Существуют несколько вариантов черных излучателей для разных областей промышленного использования. Но чаще всего они представляют собой туннели с двумя кожухами, где внутренний активный кожух нагревается группой атмосферных инжекционных горелок. Температура активного кожуха 200—500°С при тепловой нагрузке излучающей поверхности до 10 000 ккал/м²·ч. Полез-

ное тепло, излученное активной поверхностью металлического кожуха, составляет примерно половину всего внесенного количества тепла. Остальные 50% тепла теряются внешним кожухом и с отходящими газами. Потерю тепла с отходящими газами можно уменьшить соответствующей рекуперацией.

В отличие от высокотемпературных «светлых» излучателей черные излучатели имеют температуру излучающей поверхности

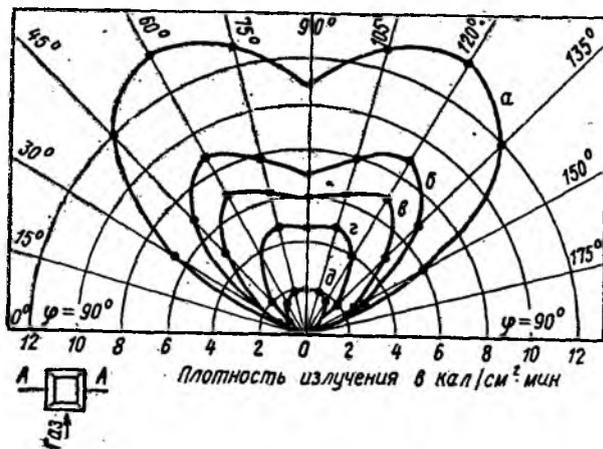


Рис. 22. Распределение плотности излучения в полусфере 12-плиточной горелки ($F_{изл} = 0,035 \text{ м}^2$); радиус полусферы в мм: а — 300; б — 400; в — 500; г — 600; д — 700

ниже температуры воспламенения паров растворителей и исключают контакт продуктов сгорания с нагреваемыми материалами. Это позволяет применить их в условиях повышенной пожаро- и взрывоопасности, например, при сушке лакокрасочных покрытий и тогда, когда нежелателен контакт продуктов сгорания с нагреваемым материалом.

Интенсивность нагрева материалов (изделий) черными инфракрасными излучателями при прочих равных условиях ниже, чем светлыми излучателями, имеющими более высокую температуру излучающей поверхности (насадка). С другой стороны, излучение от черных излучателей более равномерно по площади, чем от светлых (высокотемпературных) при одних и тех же размерах излучающей поверхности. Неравномерность излучения тем больше, чем выше температура излучающей поверхности.

При определении интенсивности излучения различных типов газовых горелок инфракрасного излучения в качестве приемника может быть использован полупроводниковый болометр ти-

па ОПБ-5К, разработанный и изготовленный Институтом физики АН УССР.

Исследованиями установлено, что у газовых горелок инфракрасного излучения с перфорированными и пористыми керамическими излучающими насадками, даже при расположении над ними стабилизирующих металлических сеток, интенсивность (плотность) излучения в различных направлениях по полусфере от нормали к насадке неодинакова (рис. 22). По нормали к

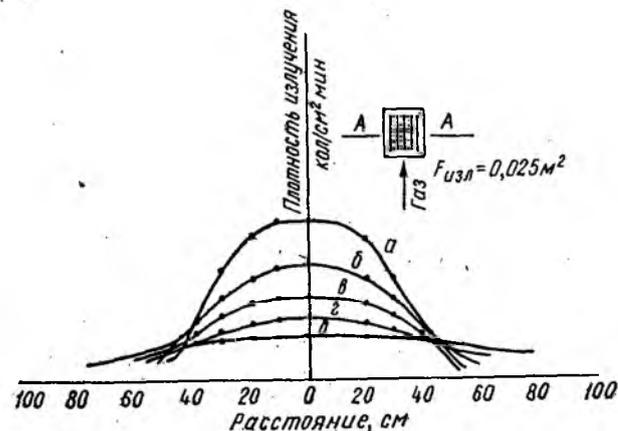


Рис. 23. Распределение плотности излучения на поверхности параллельной плоскости 12-плиточного излучателя и отстоящей от него на расстоянии в мм: а — 300; б — 400; в — 500; г — 600; д — 700 (замер в плоскости, проходящей по А—А)

поверхности ($\varphi = 90^\circ$) на близких расстояниях от излучающей насадка плотность излучения меньше, чем под углом 75° и 45° . При приближении к краям горелки ($\varphi \rightarrow 0^\circ$, $\varphi \rightarrow 180^\circ$) плотность излучения снова снижается.

Это объясняется тем, что стенки цилиндрических каналов в керамическом насадке имеют большой перепад температур по высоте (по глубине). Вследствие этого с уменьшением угла излучения φ составляющая излучения от стенок каналов $Q_{ст.кан}$ стремится к нулю, т. е.

$$Q_{изл} = Q_{перег} + Q_{ст.кан} = \varepsilon (1 - \psi_{кан}) \left[\frac{T_k}{100} \right]^4 + \varepsilon \psi_{кан} \left[\frac{T_k}{100} \right]^4,$$

где $Q_{перег}$ — тепло, излучаемое перегородками;
 $Q_{ст.кан}$ — тепло, излучаемое стенками канала.

Температура каналов зависит от их длины. Чем ближе к центру насадка, тем заметнее $\psi_{кан}$ стремится к нулю. Следовательно, излучение от стенки каналов уменьшается, т. е. второй член формулы стремится к нулю.

Отсюда можно сделать вывод, что излучение этих горелок не подчиняется закону Ламберта. Характер индикатрис яркости излучения связан с внутренним строением вещества и состоянием его поверхности, т. е.

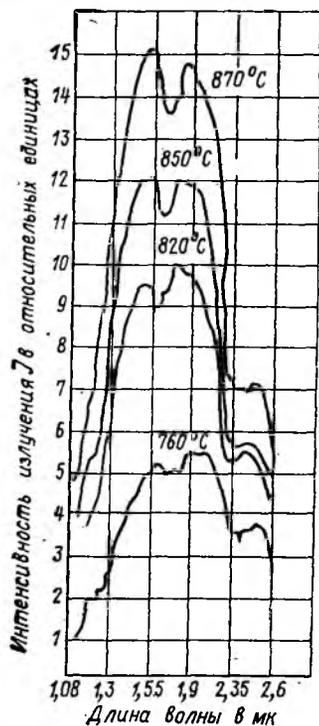


Рис. 24. Спектры излучения керамическим насадком с отверстием диаметром 1 мм и металлической сеткой

$$\frac{E_{\varphi}}{E_n} = f(\varphi).$$

Если для абсолютно черного тела $f(\varphi) = 1$, то для всех нечерных тел $f(\varphi) < 1$. Для серого тела

$$f(\varphi) = \text{const} < 1,$$

а для газовых горелок инфракрасного излучения, как мы видели,

$$f(\varphi) \neq \text{const}.$$

При расчетах излучения газовых горелок необходимо учитывать их индикатрису яркости излучения, определяющую зависимость калорической яркости излучения от направления.

Измерения лучистого потока по плоскости, параллельной горелочному насадку на различном расстоянии от него, показали, что интенсивность излучения (плотность потока) распределяется неравномерно (рис. 23). Неравномерность возрастает с приближением излучающей поверхности к облучаемой плоскости и определяется по величине среднеквадратичных отклонений отдельных лучистых потоков и от среднего лучистого потока.

С увеличением расстояния от точки замера до излучателя среднеквадратичное отклонение значительно снижается.

Среднеквадратичное отклонение составляет: для газовых 12-плиточных инфракрасных горелок — 0,5; 8-плиточных — 0,34 и 6-плиточных — 0,33.

При сравнении распределения плотностей излучения горелок с рефлектором и без него было установлено, что рефлектор не оказывает существенного влияния на распределение плотностей излучения. Поэтому для облучения по площади рекомендуется применять горелки без рефлектора.

При использовании инфракрасных горелок важно знать их спектральную характеристику и эпюры излучения.

На рис. 24 показана спектральная характеристика инфракрасной горелки с керамическим насадком и стабилизирующей

металлической сеткой, а в табл. 7 даны результаты испытаний горелки с керамическим насадком со стабилизатором и без него.

Как видно из графика, максимум излучения с увеличением температуры насадка не смещается в сторону коротких волн, т. е. здесь не соблюдается закон Вина.

Это объясняется тем, что кроме излучения самого насадка действует излучение продуктов сгорания газа, состоящих в основном из углекислоты и водяных паров, т. е. из трех атомных газов, обладающих селективностью излучения.

Поэтому горелки инфракрасного излучения с перфорированными и пористыми керамическими насадками должны рассматриваться как селективные излучатели, их максимум излучения находится в пределах 1,5—2 мк для керамических насадков со стабилизирующей металлической сеткой и 2—2,55 мк без сетки.

Из табл. 7 видно, что при наличии стабилизирующих металлических сеток значительно увеличивается энергия излучения при одной и той же удельной тепловой нагрузке горелок. Однако даже при наличии металлических сеток передача тепла излучением составляет всего лишь 45—55%, а не 60—62%, как это указано в некоторых литературных источниках.

Таблица 7

Результаты испытаний горелки с керамическим насадком без сетки стабилизатора и при установке ее

Удельная тепловая нагрузка в ккал/см ² .ч	Без сетки стабилизатора			При установке сетки стабилизатора		
	доля излучаемой энергии в % η	t_k в °C	$q_{изл}$ в ккал/см ² .ч	доля излучаемой энергии η в %	t_k в °C	$q_{изл}$ в ккал/см ² .ч
8,3	43	730	3,57	47	780	3,9
9,4	42	750	3,95	50	810	4,7
10,3	40,8	760	4,2	53	830	5,45
11,3	40	790	4,52	54,5	860	6,15

2. РАСЧЕТ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Расчет беспламенных излучающих инжекционных горелок инфракрасного излучения сводится к определению следующих величин: площади поперечного сечения форсунки, основных размеров инжекционного смесителя и суммарного сечения отверстий в керамических плитках. Исходными данными для расчета являются: расход газа $Q_{ном.г}$ м³/ч; тепловая нагрузка горелки Q ккал/ч; давление газа перед горелкой p в мм вод. ст.; удельный вес смеси газа γ_0 в кг/м³; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05 \div 1,1$; теоретический расход воздуха L_T в м³/м³; коэффициент инжекции $A' = \alpha L_T$; удельная тепловая нагрузка керами-

ческой плитки, принимаемая по опытным данным $q_y = 11 \div 14$ ккал/см²·ч, и химический состав газа.

Площадь поперечного сечения форсунки F_ϕ (рис. 25, а) при избыточном давлении газа перед форсункой менее 1000 мм вод.ст. определяется по формуле

$$F_\phi = 62,7 \frac{Q_{\text{ном.г}}}{\mu} \sqrt{\frac{\gamma_0}{p}} \text{ мм}^2,$$

где $Q_{\text{ном.г}}$ — номинальный расход газа в м³/ч;
 μ — коэффициент расхода;
 γ_0 — удельный вес смеси газа в кг/м³;
 p — давление газа перед горелкой в мм вод. ст.

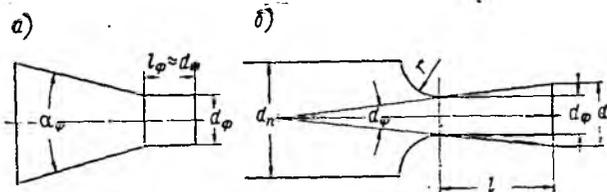


Рис. 25. Профили форсунок

а — конический с цилиндрической выходной частью;
 б — расширяющийся (Лавалья)

Коэффициент расхода μ зависит от формы форсунки. Для форсунки с внутренним углом конуса $\alpha_\phi = 30^\circ$; $\mu = 0,8$; для форсунки с внутренним углом конуса $\alpha_\phi = 90^\circ$; $\mu = 0,7$.

Длина цилиндрической части форсунки принимается равной диаметру.

Площадь поперечного сечения форсунки с внутренним углом конуса $\alpha_\phi = 30^\circ$ определяется по формуле

$$F_\phi = 78,4 Q_{\text{ном.г}} \sqrt{\frac{\gamma_0}{p}}$$

Зная площадь поперечного сечения форсунки, можно определить ее диаметр по формуле

$$d_\phi = \sqrt{\frac{4F_\phi}{\pi}}$$

Если давление газа перед форсункой больше 1000 мм вод.ст., но меньше критического, т. е.

$$\frac{p_2}{p_1} > \beta_{\text{кр}}$$

($\beta_{\text{кр}}$ — критическое отношение давления), то расчет ведется по формулам истечения при адиабатическом расширении:

$$F_\phi = \frac{Q_{\text{ном.г}}}{3600 \mu} \sqrt{\frac{K-1}{2g \frac{K}{K-1} \cdot \frac{p_1}{\gamma_0} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K}{K-1}} \right]}} \text{ м}^2,$$

где $Q_{\text{ном.г}}$ — номинальный расход газа в м³/ч;
 μ — коэффициент расхода принимается по графику (рис. 26);
 g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/сек²;
 k — показатель адиабаты;
 p_1 — абсолютное давление газа на входе перед форсункой в ата;
 p_2 — абсолютное давление газа на выходе, равное 1 ата;
 γ_0 — удельный вес смеси газа в кг/м³.

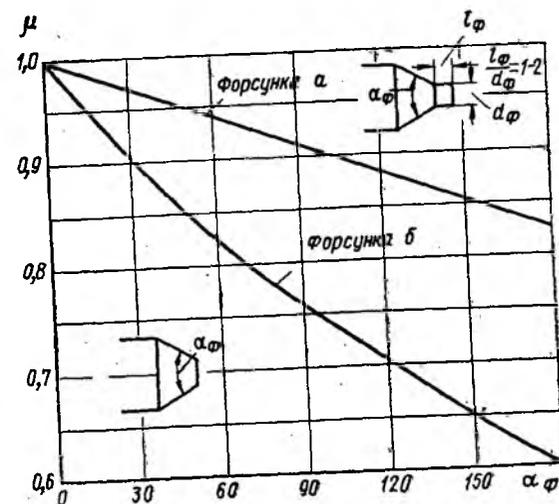


Рис. 26. Значение коэффициента расхода μ для форсунок

а — коническая форсунка с цилиндрической выходной частью; б — простая коническая форсунка

Значения K , $\beta_{\text{кр}}$ и a приведены в табл. 8.

Наконец, в тех случаях, когда $\frac{p_2}{p_1} < \beta_{\text{кр}}$, приходится устанавливать расширяющуюся форсунку Лавалья (см. рис. 25, б) и вести расчет по формуле

$$F_\phi = \frac{Q_{\text{ном.г}}}{3600 a} \sqrt{\frac{p_1 \gamma_2}{\gamma_0}} \text{ м}^2,$$

Таблица 8

Значения K , $\beta_{кр}$ и a			
Газ	K	$\beta_{кр}$	a
Воздух	1,4	0,528	2,14
Метан	1,31	0,537	2,08
Этан	1,2	0,563	1,97
Пропан	1,13	0,57	1,95
Бутан	1,11	0,572	1,95
Пентан	1,09	0,573	1,95
Природный	1,31	0,538	2,07

где $a = \sqrt{2g \frac{K}{K+1} \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{2}{K-1}}}$ — коэффициент, принимаемый по

табл. 8;

γ_r — удельный вес смеси газа перед форсункой, определяемый по формуле

$$\gamma_r = \frac{273(760 + p)}{(273 + t) 760} \text{ кг/м}^3,$$

где p — давление смеси газов перед форсункой в мм рт. ст.;
 t — температура смеси газов в °С;
 γ_0 — удельный вес смеси газов (при 0°С и 760 мм рт. ст.) в кг/м³.

Остальные обозначения такие же, как указано выше.
 Выходное сечение форсунки определяется по формуле

$$F = \frac{Q_{ном.г}}{5390 \mu p_1 \sqrt{\frac{1}{T_0 \gamma_0} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1,54} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right) \right]^{1,77}}} \text{ м}^2.$$

Длина расширяющегося насадка определяется по формуле

$$l = \frac{d - d_1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}},$$

где α_ϕ — угол между образующими расширяющегося насадка, составляет 6—12°.

$$l = (10 - 16)(d - d_1) \text{ мм.}$$

Диаметр подводящего патрубка следует принимать не менее 4—5 диаметров форсунки d_ϕ .

Для хорошо выполненной форсунки коэффициент расхода, практически равный коэффициенту скорости, должен быть не менее 0,95—0,98.

При сжигании сжиженного газа следует иметь в виду, что при работе на среднем давлении газ получает большую скорость на выходе из форсунки. Часть потенциальной энергии газа переходит в кинетическую. Температура ее понижается и возникает опасность конденсации паров сжиженного газа.

Минимальная температура газа перед форсункой, необходимая для работы без конденсации паров сжиженного газа, определяется по графику (рис. 27).

В горелках инфракрасного излучения инжекционного типа струя газа, выходящая из форсунки с большой скоростью, инжектирует воздух, необходимый для сгорания газа (см. рис. 13).

Длина пути смешивания газа с воздухом, которая зависит от расположения форсунки по отношению к смесительной камере, определяется по формуле

$$l_{см} = \frac{A_{см} d_\phi}{a},$$

где $A_{см}$ — параметр смешения в струе;
 a — коэффициент структуры в струе, примерно равный 0,07.

Параметр смешения определяется по формуле

$$A_{см} = \frac{(A' + 1) \sqrt{\alpha_c C}}{3,217},$$

где A' — кратность инжекции;

α_c — коэффициент сжатия струи, равный 0,7—0,87;

C — коэффициент различия плотности воздуха и газа ($C = 0,8 \div 0,9$).

Практически длина пути смешения газа с воздухом получается несколько меньше и определяется по формуле

$$l_{см} = (0,6 - 0,7) l_{см}.$$

$t, ^\circ\text{C}$

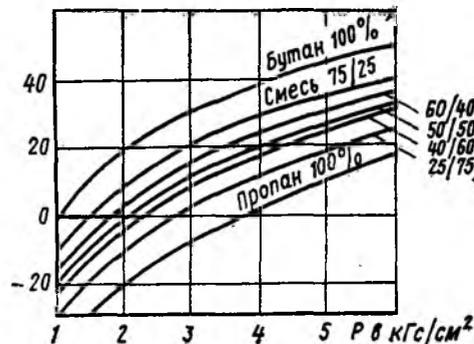


Рис. 27. Зависимость минимальной температуры сжиженного газа от давления газа перед форсункой

Площадь сечения для поступления воздуха f_v определяется из условия $v \leq 1$ м/сек.

Размеры инжектора принимаются следующие:
диаметр горловины

$$d_r = (12 \div 14) d_\phi;$$

длина горловины

$$l_1 = (2,5 \div 3) d_r;$$

диаметр диффузора

$$d_d = 1,45 d_r;$$

длина диффузора в зависимости от угла раскрытия (угол раскрытия диффузора α_d равен $4-7^\circ$)

$$l_2 = \frac{d_d - d_r}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_d}{2}};$$

диаметр конфузора составляет: $d_k = (1,8 \div 2) d_r$, а длина конфузора определяется при угле конфузора 25° по формуле

$$l_k = 2,255 (d_k - d_r).$$

Диаметр выходных отверстий керамической плитки в зависимости от состава сжигаемого газа равен $0,8-1,6$ мм. При этом скорость выхода газовой смеси должна быть в пределах $0,1-0,16$ м/сек.

Суммарная площадь керамической насадки определяется по формуле

$$f_n = \frac{Q_{\text{ном.г}} Q_n^p}{q_y} \text{ см}^2,$$

где $Q_{\text{ном.г}}$ — номинальный часовой расход газа в $\text{м}^3/\text{ч}$;
 Q_n^p — низшая теплота сгорания газа в $\text{ккал}/\text{м}^3$;
 q_y — удельная тепловая нагрузка керамической плитки, равна $11-14 \text{ ккал}/\text{см}^2 \cdot \text{ч}$.

Суммарная площадь сечения отверстий в плитке составляет примерно $45-48\%$ всей рабочей поверхности плитки.

Количество керамических плиток равно:

$$N = \frac{f_n}{f_{\text{пл}}},$$

где $f_{\text{пл}}$ — площадь одной плитки.

Пример. Определить конструктивные элементы беспламенной излучающей горелки с тепловой нагрузкой $3400 \text{ ккал}/\text{ч}$, предназначенной для сжигания газа следующего химического состава: $\text{CH}_4=97,24\%$; $\text{C}_2\text{H}_6=0,6\%$; $\text{C}_3\text{H}_8=0,17\%$; $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,18\%$; $\text{CO}_2=1\%$; $\text{N}_2=1,71\%$.

Тепловая нагрузка горелки $Q=3400 \text{ ккал}/\text{ч}$; давление газа перед горелкой $p=130 \text{ мм вод. ст.}$; удельный вес газа $\gamma_0=0,74 \text{ кг}/\text{м}^3$; коэффициент из-

бытка воздуха $\alpha=1,05$; теоретический расход воздуха $L_T=9,015 \text{ м}^3/\text{м}^3$; низшая теплота сгорания газа $Q_n^p=8500 \text{ ккал}/\text{м}^3$; удельная тепловая нагрузка керамической плитки $q_y=11 \div 14 \text{ ккал}/\text{см}^2 \cdot \text{ч}$.

Расход газа определяется по формуле

$$Q_{\text{ном.г}} = \frac{Q}{Q_n^p} = \frac{3400}{8500} = 0,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Площадь поперечного сечения форсунки определяется по формуле

$$F_\phi = 78,4 \cdot 0,4 \sqrt{\frac{0,74}{130}} \approx 2,36 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$d_\phi = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,36}{3,14}} \approx 1,7 \text{ мм}.$$

Коэффициент инжекции определяется по формуле

$$A' = 1,05 \cdot 9,015 \approx 9,376 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Коэффициент C различия плотностей воздуха и газа в первом приближении принимается равным $0,8$.

Параметр смешения находим из формулы

$$A_{\text{см}} = \frac{(9,376 + 1) \sqrt{0,7 \cdot 0,8}}{3,217} = 2,414.$$

Длина пути смешения определяется по формуле

$$l_{\text{см}} = \frac{2,414 \cdot 1,7}{0,07} = 58,5 \text{ мм}.$$

Практическая длина смешения принимается:

$$l_{\text{практ.см}} = (0,6 - 0,7) l_{\text{см}} = 0,6 \cdot 58,5 \approx 35 \text{ мм}.$$

Площадь сечения для поступления воздуха f_v определяется, если скорость $v \leq 1$ м/сек (принимается $v=0,5$ м/сек) по формуле

$$f_v = \frac{A' Q_{\text{ном.г}}}{3600 v} = \frac{9,376 \cdot 0,4 \cdot 10^6}{3600 \cdot 0,5} = 2100 \text{ мм}^2.$$

Диаметр горловины определяем по формуле

$$d_r = (12 - 14) d_\phi = 14 \cdot 1,7 \approx 24 \text{ мм}.$$

Длину горловины находим из формулы

$$l_1 = (2,5 - 3) d_r = 2,8 \cdot 24 = 67,2 \text{ мм};$$

$$l_1 \approx 67 \text{ мм}.$$

Диаметр диффузора находим по формуле

$$d_d = 1,45 d_r = 1,45 \cdot 24 \approx 35 \text{ мм}.$$

Длина диффузора равна:

$$l_2 = \frac{d_d - d_r}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_d}{2}} = \frac{35 - 24}{2 \operatorname{tg} \frac{6}{2}} \approx 105 \text{ мм},$$

а диаметр конфузора составит:

$$d_k = (1,8 - 2) d_r = 2 \cdot 24 = 48 \text{ мм.}$$

Если конфузор смонтирован под углом 25° , его длина определяется по формуле

$$l_k = 2,255 (d_k - d_r) = 2,255 (48 - 24) = 54 \text{ мм.}$$

Далее находим суммарную площадь керамической насадки по формуле

$$f_n = \frac{3400}{14} = 243 \text{ см}^2.$$

Приняв площадь одной плитки $f_{пл} = 6,9 \cdot 4,7 = 32,4 \text{ см}^2$, можно определить количество плиток:

$$N = \frac{243}{32,4} \approx 8 \text{ шт.}$$

Количество тепла на одну плитку составит:

$$q = \frac{Q}{N} = \frac{3400}{8} = 425 \text{ ккал/ч.}$$

Расход газа на одну плитку составит:

$$q_{ном.г} = \frac{425}{8500} = 0,05 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Скорость вылета газовой смеси от отверстий плитки определяется по формуле

$$v_{см} = \frac{q_{ном.г} (1 + A') 10^6}{3600 \cdot 0,785 \cdot d_n^2} = \frac{0,05 (1 + 9,376) 10^6}{3600 \cdot 0,785 \cdot 1,5^2 \cdot 682} = 0,12 \text{ м/сек.}$$

Полученная скорость укладывается в пределах допускаемых скоростей $0,1 - 0,16 \text{ м/сек.}$

Экспериментальная проверка горелок инфракрасного излучения с металлическими сетками показывает, что они могут работать на газе низкого и среднего давлений любой теплоты сгорания, если

$$\Delta p_{гв.с} \geq \Sigma \Delta p_r,$$

где $\Delta p_{гв.с}$ — располагаемый напор газовой смеси;
 $\Sigma \Delta p_r$ — суммарные потери напора на преодоление сопротивления по всему тракту горелки.

Суммарные потери напора в горелке складываются из потерь энергии во всасывающей камере ($\Delta p_{в.к}$), в инжекторе ($\Delta p_{инж}$) и в излучающей панели ($\Delta p_{изл.п}$), т. е. в металлических сетках:

$$\Sigma \Delta p_r = \Delta p_{в.к} + \Delta p_{инж} + \Delta p_{изл.п}.$$

Из трех составляющих потерь напора большая часть падает на преодоление гидравлического сопротивления сеток, расположенных в зоне высоких температур. Так как объем раскаленных продуктов сгорания, протекающих через металлические сетки, более чем в 4 раза превышает объем холодной газовой смеси,

то гидравлическое сопротивление сеток может возрасти примерно в 16 раз. Гидравлическое сопротивление сеток определяется по формуле

$$\Delta p = \frac{\xi}{2} v_{см}^2 \rho,$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления сеток;
 v — скорость выхода газовой смеси в м/сек;
 ρ — плотность газовой смеси в кг·сек²/м⁴, определяется по формуле

$$\rho = \frac{\rho_r + m \rho_v}{1 + m},$$

где ρ_r — плотность смеси газа в кг·сек²/м⁴;
 ρ_v — плотность воздуха в кг·сек²/м⁴;
 m — отношение расхода воздуха к расходу газа, равное αL_T ;
 α — коэффициент избытка воздуха для обеспечения беспламенного сжигания газа $\alpha = 1,05$;
 L_T — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м³ газа.

Во всех случаях скорость выхода смеси находим по формуле

$$v_{см} = \frac{Q_{см}}{F_{см} \cdot 3600} \text{ м/сек,}$$

где $Q_{см}$ — расход газовой смеси в м³/ч;
 $F_{см}$ — площадь живого сечения сетки в м².

Значения коэффициентов гидравлического сопротивления могут определяться по формуле

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

При

$$Re = \frac{v_{см} \delta_{ср}}{\nu} \geq 400, \text{ а при } Re < 400$$

$$\xi = K_{Re} \xi_1,$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления сетки;
 f — коэффициент живого сечения сетки:

$$f = \frac{F_0}{F_c},$$

F_0 — площадь живого сечения сетки в м²;

F_c — общая площадь сетки в м²;

Re — число Рейнольдса;

$\delta_{ср}$ — средний диаметр проволоки сетки в м;

K_{Re} — коэффициент, учитывающий влияние характера движения на потери давления;

K_{Re} — определяется по графику, приведенному на рис. 28;

$K_0 = 1,3$ для сеток, бывших в эксплуатации, а для новых $K_0 = 1$.

Проведенные экспериментальные данные показывают, что для определения коэффициентов гидравлического сопротивле-

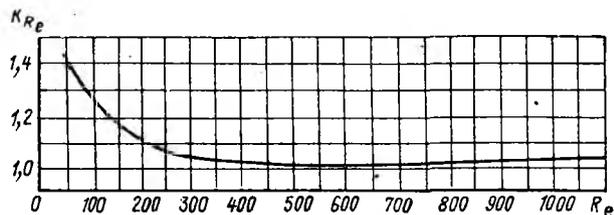


Рис. 28. Зависимость коэффициента K_{Re} от числа Рейнольдса

ния можно пользоваться приведенными формулами и графическими данными И. Е. Идельчика.

Однако коэффициент гидравлического сопротивления сеток, расположенных одна на другой, не равен сумме коэффициентов гидравлического сопротивления отдельных сеток. При расположении сеток на расстоянии 10 мм друг от друга суммарный коэффициент гидравлического сопротивления несколько увеличивается, так как при этом возникает дополнительное сопротивление от внезапного расширения потока.

Следовательно, организация беспламенного сжигания газа в горелках с металлическими сетками требует или изменения конструкции горелок в части снижения их сопротивления, или увеличения давления газа перед горелками.

Расчет излучающих горелок с пористыми плитками производится по формулам для инжекционных горелок среднего давления.

Для природного газа отношение диаметра горловины к диаметру форсунки составит:

$$\frac{d_r}{d_\phi} = 14 \div 16,$$

а для сжиженного газа будет равно:

$$\frac{d_r}{d_\phi} = 22 \div 24,$$

где d_r — диаметр горловины смесителя;
 d_ϕ — диаметр форсунки горелки.

Испытания излучателей при сжигании природного и сжиженного углеводородного газа показали, что они удовлетворительно работают на обоих видах газа без каких-либо существенных переделок.

Для давлений до 7500 мм вод. ст. кратность инъекции принимается

$$A' = 1,05 L_T \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

для давлений больше 7500 мм вод. ст.

$$A' = (1,1 \div 1,2) L_T \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Диаметры конфузора и диффузора определяются по формуле

$$d_k = d_d = (1,8 \div 2) d_r.$$

Количество пористых излучающих плиток размером $115 \times 115 \times 40$ мм находят как частное от деления номинальной тепловой нагрузки горелки на фактическую номинальную тепловую нагрузку одной плитки, равную примерно 1590—1760 ккал/ч.

3. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Газогорелочные устройства инфракрасного излучения с керамическим насадком, имеющим цилиндрические огневые каналы. В настоящее время разработано несколько типов газовых горелок инфракрасного излучения с керамическими насадками, имеющими цилиндрические каналы для выхода газозвоздушной смеси.

На рис. 29 представлена горелка ГИИ-19А института ГипроНИИгаз, предназначенная для отопления производственных помещений и для тепловой обработки различных материалов. Горелка состоит из металлического корпуса, в который вмонтированы 16 перфорированных керамических плиток. Горелка может работать на природном и на сжиженном газе низкого давления. Горелка ГИИ-19А, выпускаемая в настоящее время серийно, заменила два типа горелок ГИИ-3 и ГИИ-8, работающих на природном и сжиженном газе. Тепловая нагрузка горелки ГИИ-19А составляет 6400 ккал/ч; номинальное давление природного газа — 130 мм вод. ст.

На рис. 30 представлена унифицированная горелка ГК-1-38 института ГипроНИИгаз типа «Фонарь», предназначенная для ускоренной сушки штукатурки и прогрева стен в строящихся или ремонтируемых помещениях, а также для других видов тепловой обработки материалов. Унифицированная горелка ГК-1-38 работает на природном и на сжиженном газе. Перевод с одного вида газа на другой осуществляется заменой форсунки. Инжекционный смеситель выполнен вертикальным.

Горелка представляет собой многогранную призму, собранную из 50 керамических плиток, смонтированных в металлическом каркасе. К днищу горелки подведен инжектор, в котором происходит образование газозвоздушной смеси.

Горелка установлена на подставке и может быть закреплена в верхнем и в нижнем положениях. В целях безопасности при эксплуатации горелка укомплектована термопарой и электро-

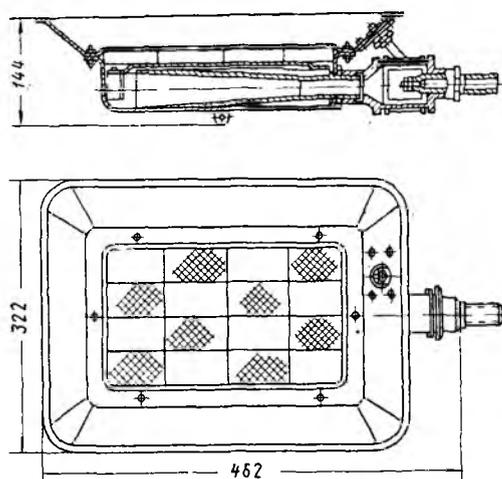
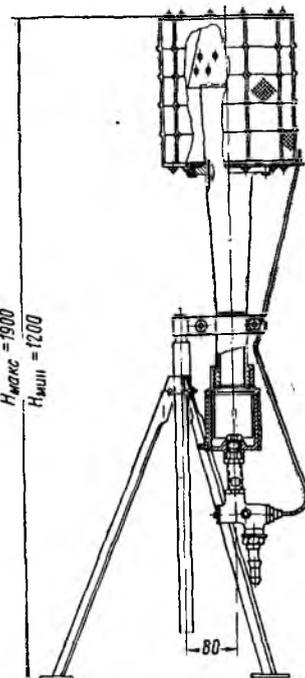


Рис. 29. Горелка инфракрасного излучения ГИИ-19А

Рис. 30. Горелка инфракрасного излучения типа «Фонарь» ГК-1-38



магнитным клапаном, отключающим газ в случае прекращения горения.

Техническая характеристика горелки следующая: тепловая нагрузка 20 000 ккал/ч; расход сжиженного газа 0,9 м³/ч, природного — 2,36 м³/ч; диаметр отверстия форсунки при работе на сжиженном газе 2,45 мм, на природном — 4,35 мм; рекомендуемое давление газа при работе на сжиженном газе 300 мм вод. ст., на природном — 130 мм вод. ст. Вес установки 12,4 кг; высота с подставкой 1900 мм (наибольшая) и 1200 (наименьшая).

На рис. 31 изображена горелка КФ-39М. Горелка предназначена для работы на природном и сжиженном газе. Горелка КФ-39М общей теплопроизводительностью 2000 ккал/ч состоит из шести элементов и устанавливается непосредственно на подводящем газопроводе после газового крана. Продукты сгорания

нагревают керамическую плитку и металлическую сетку. Вес горелки 1,05 кг.

На рис. 32 показана горелка КГ-3. Горелка нашла широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Она проста по конструкции. Корпус ее (смесительная камера) и инжектор-смеситель изготавливаются литыми из низкосортного алюминия. В верхней части корпуса имеются пазы, в которые

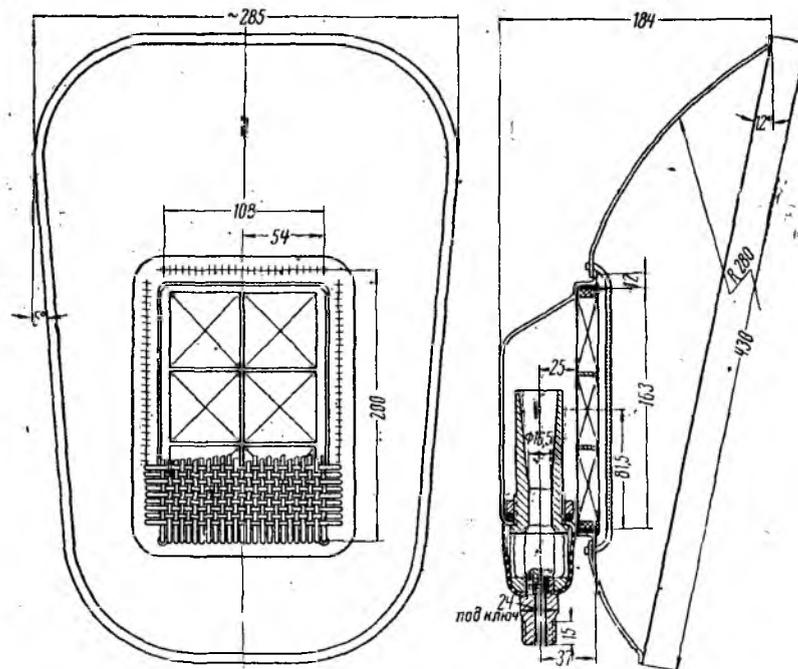


Рис. 31. Горелка инфракрасного излучения КФ-39М

вставляется рамка из нержавеющей стали, удерживающая блок из 12 стандартных керамических плиток. Форсунка горелки находится в защитной коробке, крепящейся на болтах к корпусу. Первичный воздух поступает через сетку (фильтр), укрепленную на задней стенке горелки. Поэтому при работе на открытом воздухе ветер не попадает на форсунку и не может отклонять струю выходящего из нее газа. Это дает возможность при незначительной скорости ветра (до 1,5 м/сек) использовать горелку для работы на открытых площадках. Над керамическим блоком в качестве стабилизатора горения установлена нихромовая сетка. Рефлектор горелки изготовлен из полированного алюминия. Уплотнение блока керамики с корпусом осуществляется асбестовым шнуром на замазке, приготовленной из керамиче-

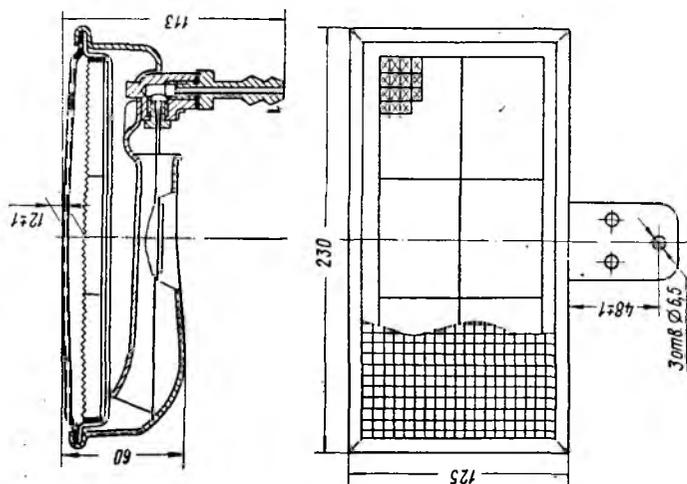


Рис. 33. Горелка инфракрасного излучения «Звездочка»

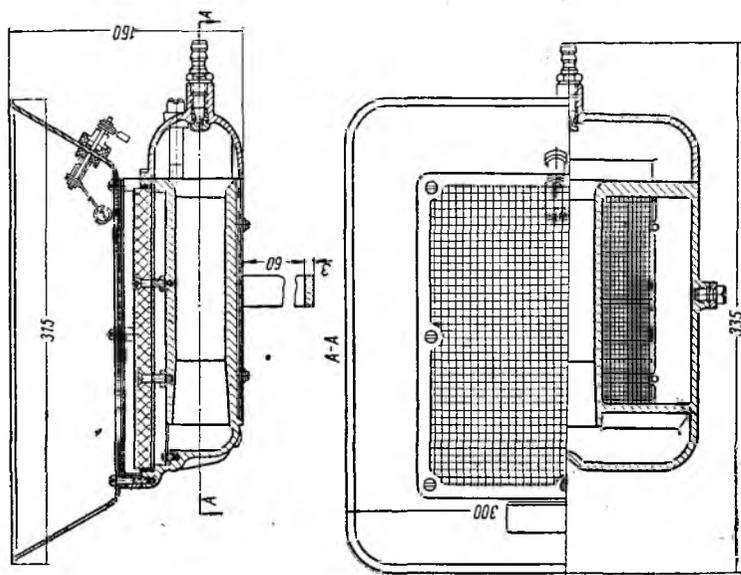


Рис. 32. Горелка инфракрасного излучения КГ-3

ского порошка на основе жидкого стекла. Тепловая нагрузка горелки на природном газе 4250, на сжиженном — 3600 ккал/ч; номинальное давление природного газа 130, сжиженного — 300 мм вод. ст.; диаметр отверстия форсунки при работе на природном газе 1,65, на сжиженном — 1,1 мм; вес горелки 3,1 кг.

На рис. 33 представлена горелка «Звездочка». Горелка изготовляется в двух вариантах для работы на сжиженном газе («Звездочка 1») и для работы на природном газе («Звездочка 2»). Конструктивно горелка состоит из корпуса керамического насадка, стабилизирующей сетки, форсунки и кронштейнов. Корпус горелки изготовлен из двух штампованных деталей, сваренных контактной сваркой. Корпус образует две полости: газовоздушный смеситель, выполненный в виде трубы Вентури, и распределительную камеру, образующуюся между корпусом и излучающим насадком. В корпусе установлена крестовина (форсункодержатель), куда ввертываются форсунка и штуцер для подсоединения газоподводящего шланга. Излучающий насадок состоит из 6 плиток с пирамидальными вершинами размером $65 \times 45 \times 12$, имеющих по 1004 цилиндрических отверстия (канала) диаметром 1 мм. Насадок устанавливается в специальной рамке, которая соединяется с корпусом. Стабилизирующая сетка выполнена из окалиностойкой стали и установлена над керамическим насадком. Кронштейны служат для крепления горелок к металлоконструкциям. Горелки могут монтироваться либо стационарно, либо на передвижных установках в вентилируемых помещениях. Техническая характеристика горелок «Звездочка» по паспортным данным приведена в табл. 9.

Таблица 9

Техническая характеристика горелок типа «Звездочка»

Наименование	Единица измерения	«Звездочка 1»		«Звездочка 2»	
		минимальный показатель	максимальный показатель	минимальный показатель	максимальный показатель
Тепловая нагрузка	ккал/ч	1300	2400	1550	2700
Расход газа	м ³ /ч	0,06	0,11	0,18	0,32
Давление газа	мм вод. ст.	120	400	50	160
Температура поверхности керамики	°С	700	900	720	920
Внутренний диаметр присоединительного шланга	мм	12	12	12	12
Вес	кг	1	1	1	1

Большой интерес для промышленного использования представляет газовая горелка инфракрасного излучения ГИИБЛ (рис. 34). Горелка представляет собой элемент, дающий воз-

возможность компоновать блоки (панели) инфракрасного излучения различных форм и размеров. Она предназначена для сушки и тепловой обработки различных изделий и материалов в промышленности и в сельском хозяйстве. Горелку можно применять только в местах, недоступных для ветра. Конструктивно горелка состоит из корпуса, керамического насадка, сетки, форсунки

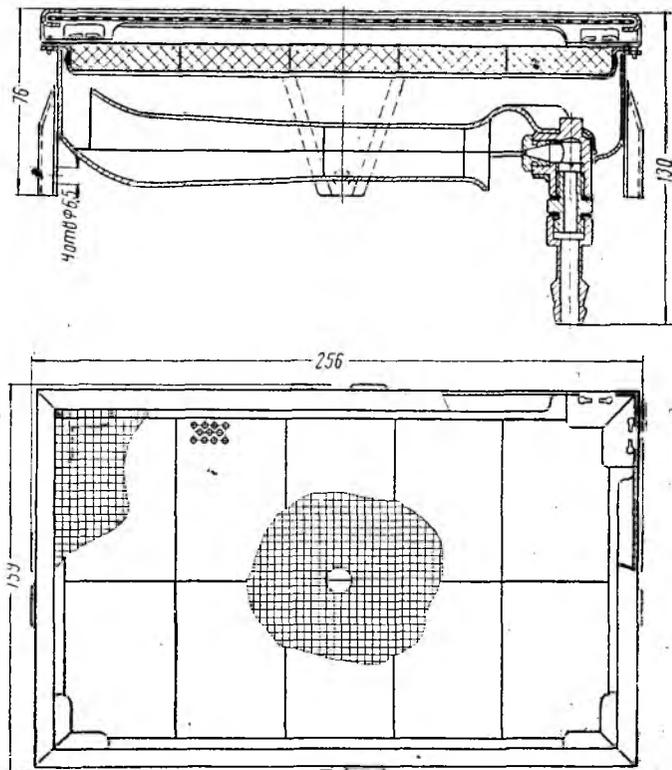


Рис. 34. Горелка инфракрасного излучения ГИИБЛ

и кронштейнов. Корпус горелки смонтирован из двух штампованных деталей, т. е. из половины инжектора и распределительной камеры, сваренных между собой контактной сваркой. Рефлектор отсутствует. Изменены узлы установки блока керамики и крепления горелки. Теплотехнические данные горелки следующие: тепловая нагрузка по паспортным данным колеблется в пределах 2400—4000 ккал/ч в зависимости от давления и состава газа. Расход сжиженного газа составляет 0,1—0,16 м³/ч и природного газа — 0,28—0,5 м³/ч. Вес горелки 1,7 кг.

На рис. 35 представлена излучающая горелка ИГ АН УССР. В смеситель поступает газозвдушная смесь, которая затем

проходит через насадок, состоящий из двух камер с отверстиями для выхода газозвдушной смеси. На выходе из внутренней камеры с большим числом отверстий смесь хорошо перемешивается и выходит из отверстий керамического насадка.

Эта горелка не может быть использована для работы на открытых площадках при скоростях ветра, превышающих 1,5—2 м/сек.

Успешное использование описанных газовых инфракрасных излучателей для обогрева рабочих мест на открытых площад-

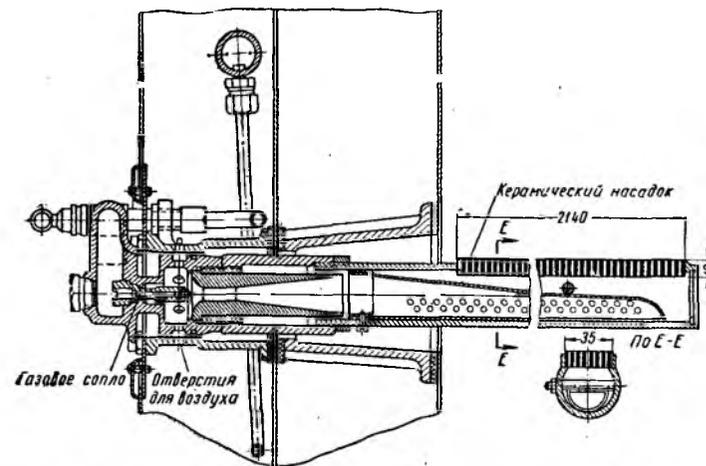


Рис. 35. Горелка инфракрасного излучения ИГ АН УССР

ках было возможно только при установке щитов и легких стекол, защищающих их от воздействия ветра.

В настоящее время разработано несколько типоразмеров ветроустойчивых горелок. В процессе работы над этими горелками были выявлены две причины их погасания.

При воздействии ветра на излучающую панель (керамические плитки) горелки скоростной напор воздуха переходит в статическое давление, которое тем выше, чем больше скорость ветра. Как известно, увеличение давления перед огневыми отверстиями инжекционных горелок приводит к снижению коэффициента инжекции и, следовательно, к уменьшению количества тепла, выделяемого сгорающим газом (при недостаточном количестве первичного воздуха газ частично сгорает за счет вторичного). Сгорание происходит на некотором расстоянии от излучающей панели. Она получает меньше тепла, начинает остывать. Наступает такой момент, когда панель остывает настолько, что уже не может поджечь новую порцию газозвдушной смеси, поступающей к ней, и горелка гаснет.

Для устранения погасания горелки, работающей на ветру, можно применить автоматическое саморегулирование перепада давления на керамических плитках при воздействии ветра (рис. 36).

На корпус горелки 4 для забора воздуха инжектором 3 надевают дополнительный кожух 5, в который через рефлектор 1 поступает воздух для образования в горелке газозвдушной смеси.

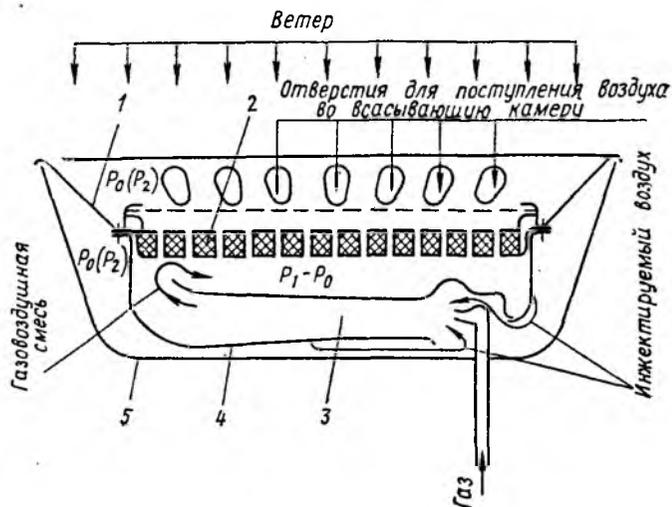


Рис. 36. Принципиальная схема ветроустойчивой горелки инфракрасного излучения с саморегулированием перепада давления на горелочном насадке

1 — рефлектор; 2 — керамический насадок; 3 — инжектор-смеситель; 4 — корпус горелки; 5 — кожух

При отсутствии ветра давление под кожухом и на наружной поверхности керамических плиток 2 равно атмосферному, т. е. p_0 . Инжектор за счет энергии струи газа, выходящей из форсунки, создает в корпусе перепад давлений газозвдушной смеси $p_1 - p_0$, под действием которого смесь проходит через отверстия керамических плиток и сгорает. Скоростной напор ветра преобразуется в статическое давление p_2 , которое воздействует на поверхность керамических плиток. Одновременно такое же статическое давление p_2 возникает и под кожухом. Таким образом, если без ветра инжектор создавал давление в корпусе p_1 , то теперь давление в нем будет больше на величину $p_2 - p_0$, т. е. равно $p_1 + p_2$, а перепад давлений на керамических плитках остается постоянным, т. е.

$$(p_1 + p_2 - p_0) - p_2 = p_1 - p_0.$$

Постоянный перепад давлений на керамических плитках горелки сохраняет коэффициент инжекции неизменным, что приводит к полному сгоранию газа и относительно высокой теплопередаче горелки при воздействии ветра. Благодаря тому что отверстия для забора воздуха, идущего на образование газозвдушной смеси, находятся в нижней части рефлектора, продукты сгорания не попадают под кожух и не влияют на работу горелки. Ветроустойчивость горелки понижается с понижением температуры воздуха, так как стабильность горения газа нарушается вследствие охлаждения излучающего насадка.

При воздействии ветра воздух, соприкасающийся с раскаленными керамическими плитками, нагревается и удаляется с продуктами сгорания газа. Происходит конвективный съем тепла холодным воздухом, поток которого увеличивается с возрастанием скорости ветра. Это приводит к тому, что керамические плитки интенсивно охлаждаются и горелка гаснет.

Чем выше первоначальная температура поверхности керамических плиток, тем больше их способность сопротивляться охлаждающему действию ветра. Поэтому горелочный насадок необходимо нагревать более чем на 900°C .

Плитки, способные работать без проскоков пламени при температуре 950°C , имеют максимальный диаметр отверстий, равный 1 мм. Они обладают небольшим гидравлическим сопротивлением, благодаря чему можно использовать низкое давление газа.

Размер керамических плиток $45 \times 65 \times 12$ мм, количество отверстий равно 1350, площадь живого сечения составляет 36%.

В настоящее время созданы ветроустойчивые горелки инфракрасного излучения типов ГИИВ-1, ГИИВ-2, «Марс 1» и «Марс 2» (рис. 37 и 38).

Конструкция этих горелок одинакова (они отличаются лишь количеством плиток и диаметрами форсунок). Горелки состоят из корпуса керамического излучателя с металлической сеткой, форсунки, рефлектора, кожуха и кронштейна. Корпус горелки выполнен из двух штампованных деталей — половины инжектора и распределительной камеры, сваренных между собой контактной сваркой. Вторая половина инжектора выштамповывается в днище распределительной камеры. В корпус горелок вмонтирована крестовина, в которой расположены форсунка и штуцер для подсоединения газоподводящего шланга. Излучатель собирается из десяти или двадцати стандартных керамических плиток (для горелок ГИИВ-1 и ГИИВ-2 соответственно) и монтируется в металлической рамке из жаропрочной стали. Сетка-стабилизатор выполнена из окалиностойкой стали Х20Н80. Рефлектор выполнен из алюминия. В нем образовано 9 или 12 отверстий для поступления воздуха под кожух. Таким образом между корпусом горелки, рефлектором и кожухом создается объемная камера. Ветер, попадая в отверстия рефлектора, сво-

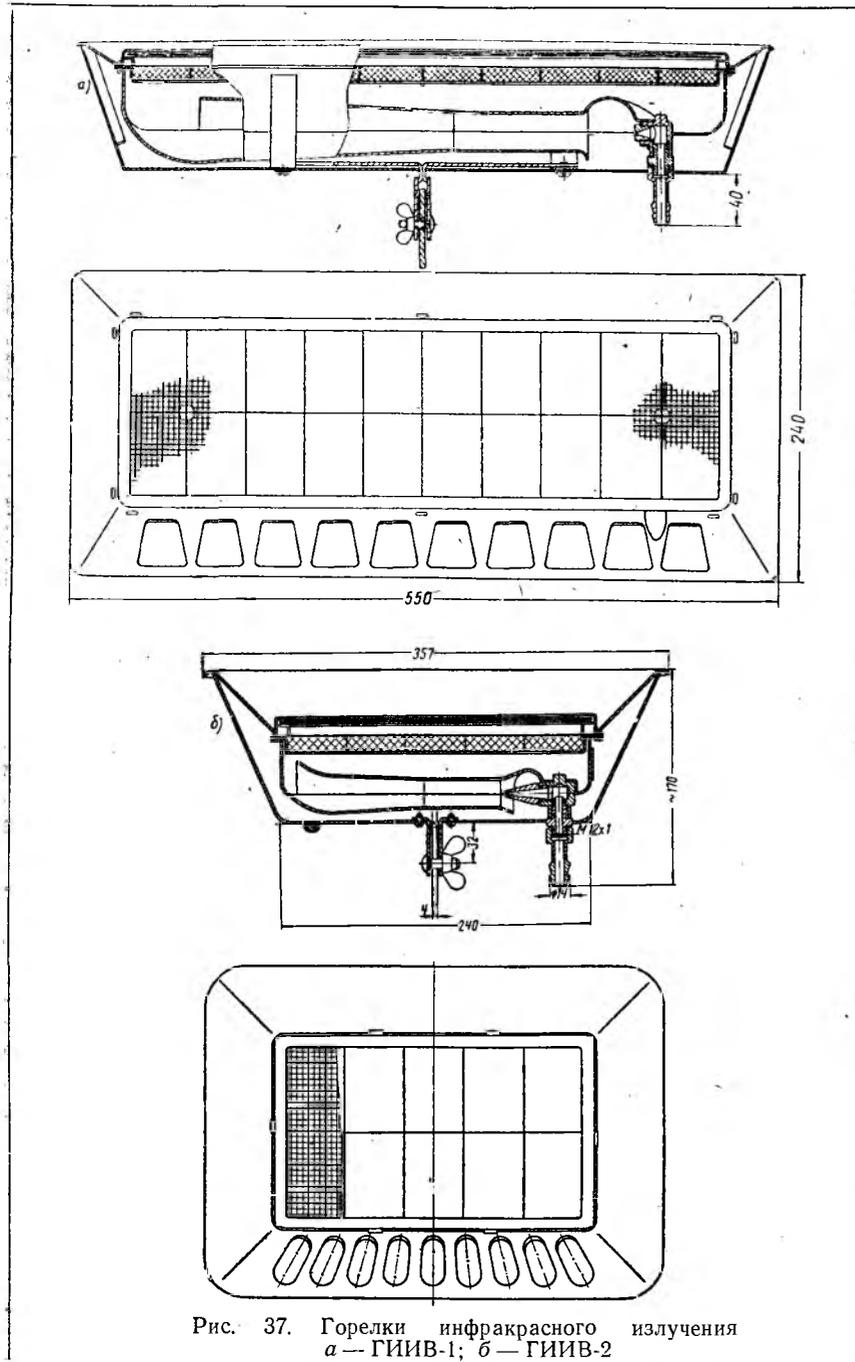


Рис. 37. Горелки инфракрасного излучения
а — ГИИВ-1; б — ГИИВ-2

бодно подходит к инжектору, способствуя выравниванию давления снаружи и внутри корпуса горелки. Горелка не задувается.

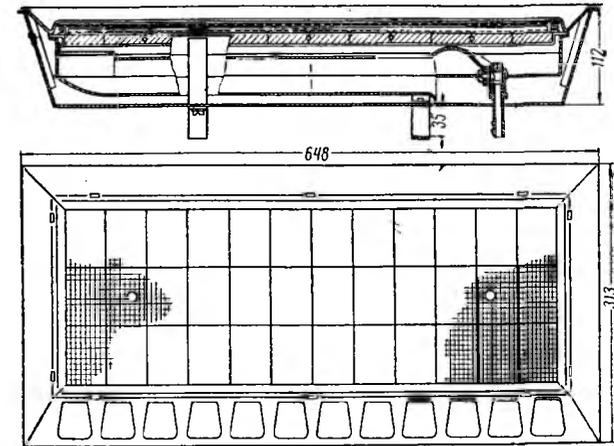


Рис. 38. Горелка инфракрасного излучения «Марс»

Горелки ГИИВ-1 и ГИИВ-2 работают на природном и сжиженном газе. Техническая характеристика горелок типов ГИИВ-1, ГИИВ-2 приведена в табл. 10 и 11.

Таблица 10
Техническая характеристика ветроустойчивых горелок инфракрасного излучения типа ГИИВ

Характеристика	Единица измерения	ГИИВ-1		ГИИВ-2	
		сжиженный газ	природный газ	сжиженный газ	природный газ
Тепловая нагрузка по паспортным данным	ккал/ч	2200—4000	2400—4500	4400—8000	4800—9000
Расход газа	м ³ /ч	0,1—0,18	0,28—0,53	0,2—0,36	0,56—1,06
Давление газа	мм вод. ст.	150—500	70—250	150—500	70—250
Диаметр отверстия форсунки	мм	1	1,6	1,4	2,2
Температура поверхности излучателя	°С	720—900	750—920	720—900	750—920
Ветроустойчивость под различными углами:					
90°	м/сек	3—5,5	3—5,5	3—5,5	3—5,5
45°	»	4—6	4,4—6,8	4—6	4,4—6,8
0°	»	5,5—7,5	7—8	5,5—7,5	7—8
Вес горелки	кг	2,7	2,7	4,7	4,7

Таблица 11

- Техническая характеристика ветроустойчивых горелок «Марс-1» (для работы на сжиженном газе) и «Марс-2» (для работы на природном газе)

Характеристика	Единица измерения	„Марс-1“		„Марс-2“	
		минимальный показатель	максимальный показатель	минимальный показатель	максимальный показатель
Тепловая нагрузка по паспортным данным	ккал/ч	7900	14 500	9000	16 000
Давление газа	мм вод. ст.	120	400	50	160
Расход газа	м ³ /ч	0,36	0,66	1,06	1,9
Температура поверхности керамики	°С	700	900	720	920
Ветроустойчивость	м/сек	3	5,5	3	5,5
Внутренний диаметр присоединительного шланга	мм	12	12	12	12
Вес	кг	6,54	6,54	6,54	6,54

На рис. 39 показана ветроустойчивая горелка инфракрасного излучения ГК-23. Горелка состоит из корпуса с заборным устройством для воздуха (жалюзийной решетки с тыльной части горелки), инжектора, насадка, рассекателя, служащего для равномерного распределения газозвушной смеси в керамический насадок, форсунки для подачи газа, кожуха, рефлектора и стабилизирующей металлической сетки. Диаметр отверстия в керамических плитках 0,85 мм, количество отверстий на 1 плитку 1525 шт. Металлическая сетка марки № 2 из стали 1Х18Н9Т или Х20Н80. Для розжига горелки предусмотрена электрическая свеча с изолятором. Горелка не затухает при лобовом действии ветра до 6 м/сек. Техническая характеристика горелки по паспортным данным: номинальная тепловая нагрузка 11 500—16 000 ккал/ч; номинальный расход природного газа 1,35—1,85 м³/ч, сжиженного газа 0,58 м³/ч; номинальное давление природного газа 1000—3000 мм вод. ст.; сжиженного газа 2500 мм вод. ст.; диаметр форсунки для природного газа 1,8 мм, для сжиженного газа 0,8 мм; вес горелки 5 кг; ветроустойчивость 6—8 м/сек.

На рис. 40 изображена горелка типа «Палец», а на рис. 41 — модификация горелки инфракрасного излучения типа «Радиант-15». Основной вариант (рис. 41, а) представляет собой горелку со штампованным корпусом из листовой стали. Инжектор (труба Вентури) изготавливается штампованным из двух пластин электрооцинкованной стали. Части инжектора свариваются между собой точечной сваркой. Форсунка латунная, а наружная сетка изготовлена из хромоникелевой стали. Горелка типа «Кирпич» по конструкции аналогична горелке типа «Радиант-15».

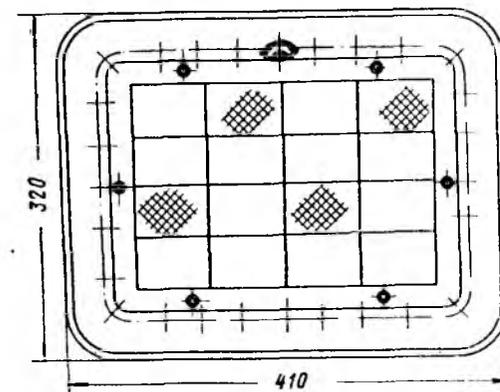
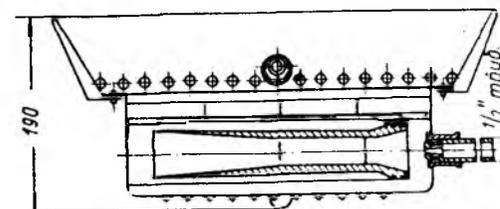


Рис. 39. Горелка инфракрасного излучения ГК-23

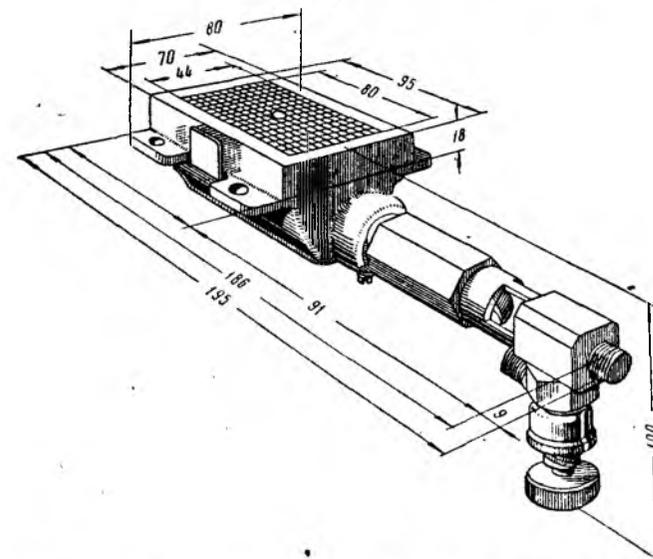


Рис. 40. Горелка инфракрасного излучения типа «Палец»

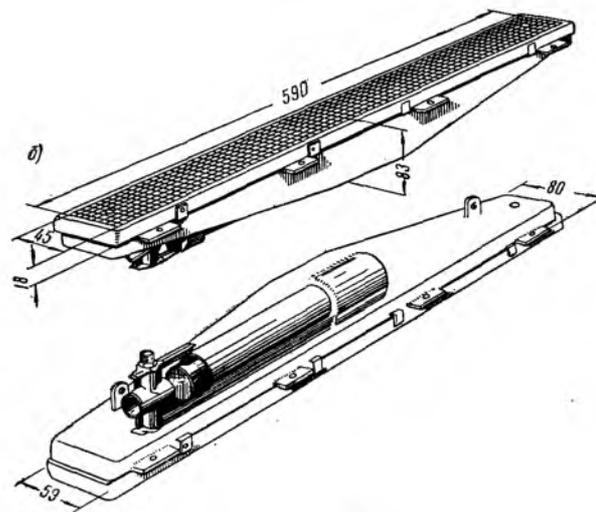
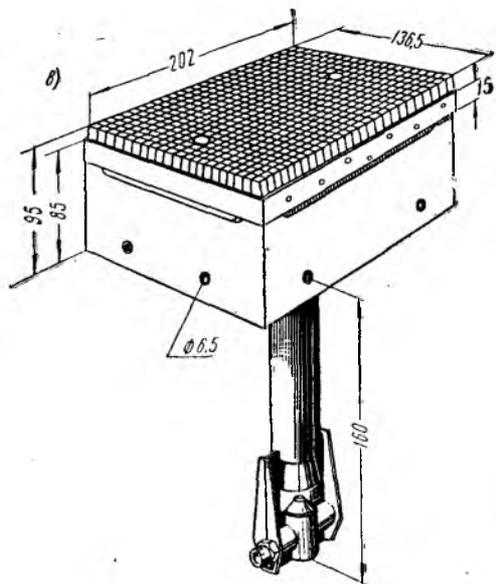
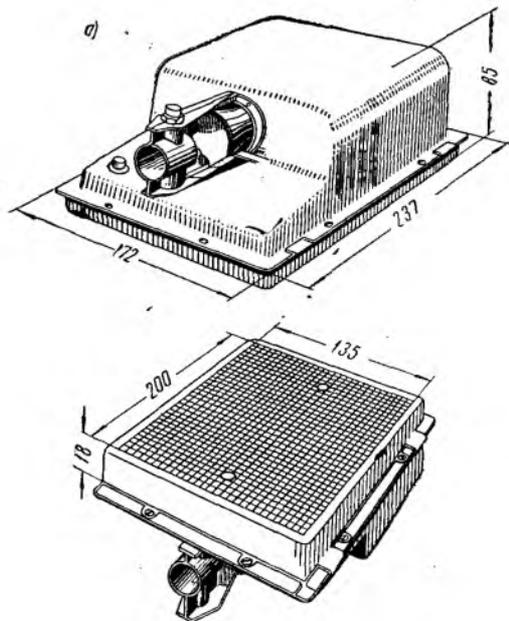


Рис. 41. Горелка инфракрасного излучения типа «Радиант-15»

a — основной вариант; *б* — удлиненный вариант; *в* — модель «Кирпич»

Отличительной особенностью ее является возможность соединять болтами различное число горелок, т. е. она позволяет монтировать нагревательные панели любых размеров. Рефлектор изготавливается из полированного алюминия. Для отвода продуктов сгорания служит промежуточное отверстие в рефлекторе.

Горелка «Радиант-30» (рис. 42) выпускается в двух вариантах: для промышленных целей и обогрева различных помещений. Последний вариант отличается более качественной внешней отделкой. Горелка состоит из тех же элементов, что и горелка «Радиант-15».

Горелка «Радиант-60» также выпускается в двух вариантах. По форме и конструкции она аналогична горелке «Радиант-30» и отличается только габаритами, количеством керамических плиток, диаметрами инжектора и форсунки. Количество керамических плиток 60.

Перечисленные горелки испытывались в Советском Союзе в различных условиях и показали надежную и стабильную работу как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе. На открытом воздухе горелки испытывались при скоростях ветра до 3 м/сек, случаев погасания горелок не наблюдалось.

Оригинальным в конструкции горелок «Радиант-15», «Радиант-30» и «Радиант-60» является устройство для установки блока керамических плиток (рис. 43). Основание насадка ком-

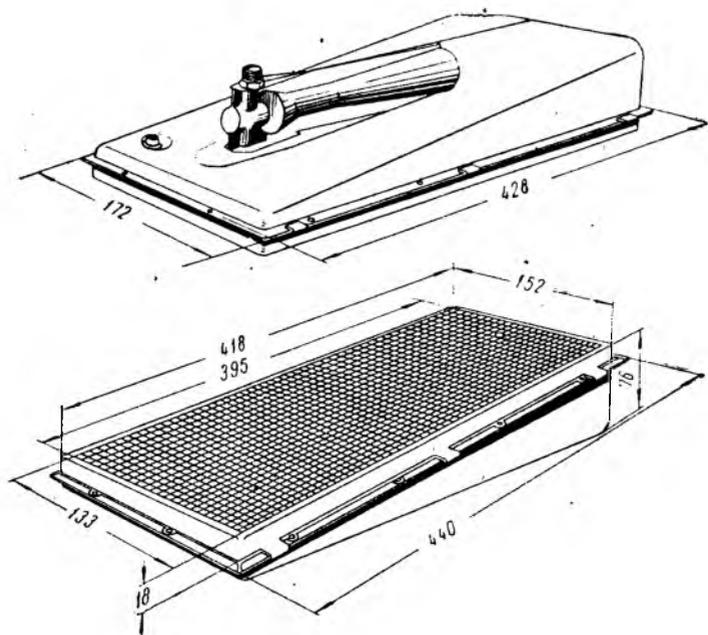


Рис. 42. Горелка инфракрасного излучения «Радиант-30»

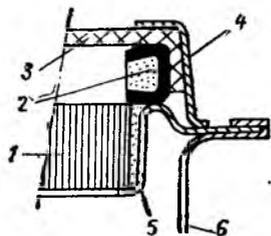


Рис. 43. Узел крепления блока керамических плиток в корпусе горелок инфракрасного излучения

1 — керамический насадок; 2 — уплотнение; 3 — стабилизирующая жаропрочная сетка; 4 — рамка; 5 — компенсирующее основание; 6 — корпус горелки

пенсрует температурное расширение корпуса, а также предотвращает растрескивание керамического блока и уплотнения.

Расход пропана при сжигании его в горелках названных типов зависит от величины давления газа и диаметра форсунки (табл. 12).

Количество тепла, излучаемого горелками фирмы «Антаргаз» при диаметре форсунки 0,65 мм, давлении 1000 мм вод. ст. и тепловой нагрузке 2165 ккал/ч, приведено в табл. 13.

Таблица 12

Зависимость расхода сжиженного газа от давления газа и диаметра форсунки в горелках фирмы «Антаргаз»

Давление газа в мм вод. ст.	Форсунка $d=0,65$ мм		Форсунка $d=0,7$ мм	
	расход газа в кг/ч	тепловая нагрузка в ккал/ч	расход газа в кг/ч	тепловая нагрузка в ккал/ч
500	0,129	1510	0,152	1780
1000	0,185	2165	0,214	2505
1500	0,228	2670	0,266	3110
2000	0,269	3150	0,31	3630
2500	0,307	3590	0,35	4095

Таблица 13

Количество тепла, получаемого горелками фирмы «Антаргаз»

Расположение горелки	Излучаемое тепло	
	в ккал/ч	в %
Горизонтально (с рефлектором)	1330	61,5
» (без рефлектора)	1550	71,5
Наклонено под углом 45° (с рефлектором)	1210	56
То же, 45° (без рефлектора)	1320	61

Изменение количества излучаемого тепла в горелках в зависимости от тепловой нагрузки приведено в табл. 14.

Таблица 14

Изменение количества излучаемого тепла в горелках фирмы «Антаргаз»

Тепловая нагрузка в ккал/ч	Излучаемое тепло в %			
	горелка без рефлектора		горелка с рефлектором	
	горизонтально	под углом 45°	горизонтально	под углом 45°
2000	71,5	60	61	55,5
2250	72	61	62	56
2500	70	62,5	60,5	56,5
2750	68,5	61	59	57
3000	67	60	59	56,5
3250	66	60	58	56

Техническая характеристика выпускаемых фирмой горелок приведена в табл. 15.

Техническая характеристика газовых горелок инфракрасного излучения фирмы «Антаргаз»

Тип горелки	Количество плиток в шт.	Излучающая поверхность в $см^2$	Номинальное количество излучаемого тепла в $ккал/ч$	Вес в кг
«Палец»	2	36	270	0,95
«Радиант-15»	15	270	2000	1,765
«Радиант-30»	30	540	4000	1,9
«Радиант-60»	60	1080	8000	3,05
«Радиант-525»	525	10 000	75 000	5,53
				27,56

В приведенных выше конструкциях горелок в качестве излучающей поверхности используются керамические плитки с большим количеством отверстий малого диаметра. Эти плитки оказывают значительное сопротивление потоку газовой смеси, проходящей через их отверстия.

Поскольку горелки инфракрасного излучения работают на газе низкого давления, любая потеря напора затрудняет получение газовой смеси необходимого стехиометрического состава.

Увеличение площади свободного сечения плитки за счет большого количества отверстий в них или большего их диаметра снижает механическую прочность плитки, а также приводит к нарушению стабильности процесса горения.

Потеря давления через щели значительно меньше, чем через отверстия какой-либо другой формы при одинаковых условиях. Поэтому для уменьшения потери давления рекомендуется в верхней зоне излучающей плитки выполнять круглые отверстия, переходящие в верхней части плитки в непрерывную щель. Это также обеспечит наибольшую механическую прочность плитки.

На рис. 44 изображена горелка со щелевыми отверстиями в излучающей насадке. В раме 1 корпуса установлена огнеупорная плитка 2 с узкими параллельными щелями 3 шириной 1 мм, сдвинутыми одна относительно другой. Расстояние между ними 2,5 мм. По ширине плитки расположены четыре—пять щелей. Параллельно оси корпуса расположен смеситель 4.

При работе горелки в результате нагревания стенок между щелями на поверхности плитки создается зона горения с равномерной температурой, препятствующая отрыву пламени.

Форма сечения щелей гарантирует устойчивое горение и способствует замедленному истечению газа по толщине плитки. Выходная часть щели в три раза больше входной, в результате чего скорость истечения на выходе в 3 раза меньше, чем на входе.

Горизонтальное сечение стенок между щелями у входной поверхности больше, чем у выходной. Поэтому входная часть нагревается меньше.

Равномерное распределение (по давлению и составу) газовой смеси по всей излучающей поверхности осуществляется различными способами. В одной горелке для более равно-

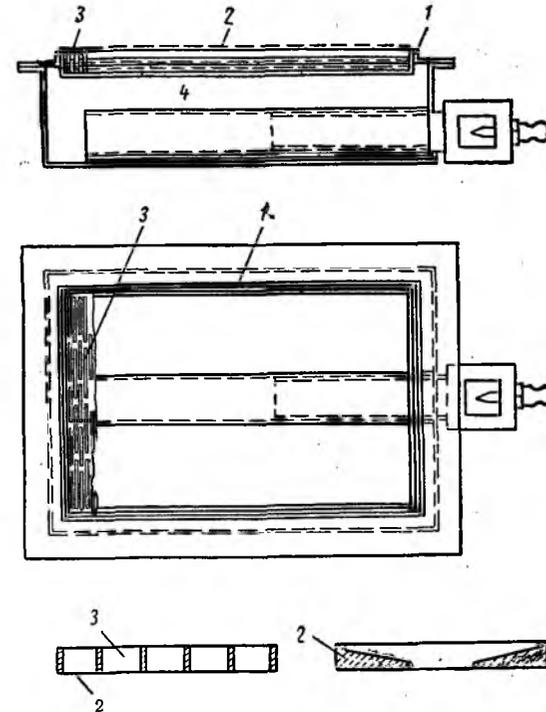


Рис. 44. Горелка инфракрасного излучения со щелевыми отверстиями

мерного распределения горючей смеси по отверстиям керамических плиток использован принцип отклонения потока с некоторым завихрением.

В другой горелке со щелевым отверстием в насадке (рис. 45) образование однородной смеси в смесительной трубке 1 и распределительной камере 2 обеспечивается осевым центрированием газовой форсунки и смесительной трубки.

Для равномерного распределения газовой смеси и дополнительного ее перемешивания торцовая стенка 3 распределительной камеры имеет изогнутую форму. Камера такой формы способствует подводу горючей смеси без завихрения к поверхности горения 4. Внутри камеры установлены распреде-

лительные поверхности 5 и 6, которые способствуют спокойному и равномерному течению потока.

Газогорелочные устройства инфракрасного излучения с металлическими сетчатыми насадками. Горелки инфракрасного излучения с керамическими насадками обладают малой механической прочностью и некоторой неравномерностью нагрева насадка, что ограничивает их применение.

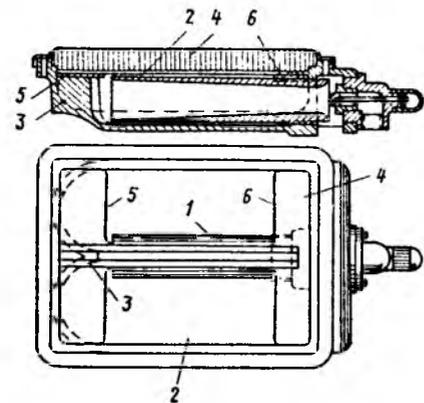


Рис. 45. Горелка инфракрасного излучения с центрированием газовой форсунки и смесительной трубки

Горелки с излучающими насадками в виде набора металлических сеток не имеют этих недостатков. Больше того, при тех же тепловых нагрузках они дают более высокую температуру нагрева излучающего насадка и, следовательно, более высокую отдачу тепла в виде лучистой энергии (коэффициент излучения).

На рис. 46 представлена горелка инфракрасного излучения с тепловой нагрузкой 3200 ккал/ч института Мосгаз-

проект. Горелка состоит из смесительной камеры, инжектора и металлических сеток (огневой насадок).

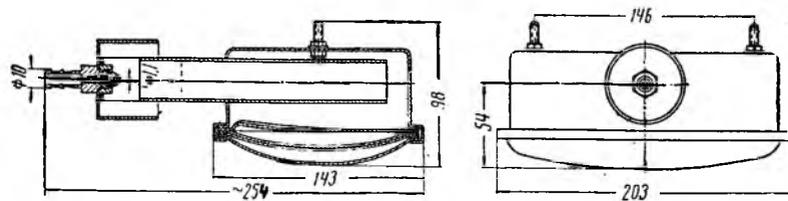


Рис. 46. Горелка инфракрасного излучения с тепловой нагрузкой 3200 ккал/ч (3518-01-00)

Смесительная камера представляет прямоугольную штампованную коробку, которая оканчивается насадком, состоящим из трех слоев мелкоячеистой сетки. Сбоку в смесительную камеру вварен цилиндрический инжектор диаметром 28 мм и длиной 165 мм с форсункой. Диаметр отверстия форсунки 1,1 мм, тепловая нагрузка горелки 3200 ккал/ч, расход газа при $Q_p = 20\ 000$ ккал/м³ 0,145 м³/ч, вес 1,28 кг.

На рис. 47 показана горелка ГК-27 с металлическим сетчатым излучающим насадком института Гипроннигаз. Горелка состоит из корпуса, смесителя с инжектором, рассекателя, служащего для равномерного распределения потока газовой смеси в зону горения, форсунки и излучающих поверхностей, состоящих из двух сеток, рефлектора. Подготовленная газовоздушная смесь, выходя через отверстия предохранительной и на-

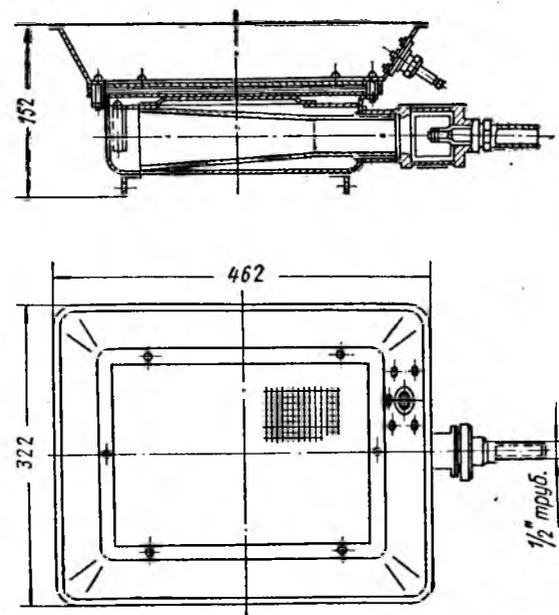


Рис. 47. Горелка инфракрасного излучения с металлическим сетчатым насадком ГК-27

ружной сеток, зажигается искровым способом от электросвечи, укрепленной на рефлекторе изолятором.

В момент зажигания пламя проскакивает через отверстия верхней сетки и дальнейший процесс горения происходит в пространстве между сетками. Тепловая нагрузка горелки 6400 ккал/ч; расход природного газа 0,75 м³/ч, сжиженного газа 0,29 м³/ч; давление природного газа 130 мм вод. ст., сжиженного — 300 мм вод. ст.; диаметр отверстия форсунки при работе на природном газе 2,4 мм, на сжиженном — 1,6 мм, вес горелки 5,5 кг.

На рис. 48 приведена принципиальная схема горелки типа «Фонарь» (КГ-16) института Гипроннигаз.

Горелка КГ-16 состоит из форсунки 1 для сжиженного или природного газа, инжекционной камеры 2, смесителя и диффу-

зора 3, топочной камеры 4, рассекателя 5, излучающей чугунной насадки 6, предохранительной сетки 7.

Природный или сжиженный газ под низким давлением подводится к форсунке. Подготовленная в смесителе газозвдушная смесь выходит через предохранительную сетку 7 в топочную камеру 4, затем через отверстия насадка 6 наружу. Предварительное зажигание газозвдушной смеси производится на поверхности насадка. При этом пламя проникает через его отверстия в топочную камеру 4, где происходит основной процесс горения. Сгорая в топочном объеме, газозвдушная смесь раскаляет чу-

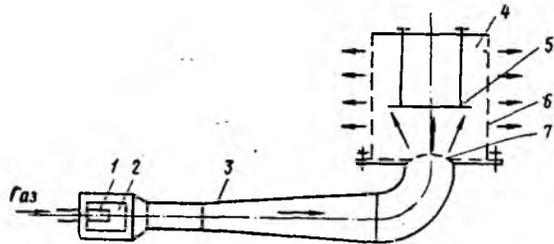


Рис. 48. Принципиальная схема горелки инфракрасного излучения типа «Фонарь» КГ-16

гунный насадок до температуры 800° С, который становится источником (излучателем) тепловой энергии. Передача тепловой энергии излучением происходит с наружной и внутренней поверхностей насадка через отверстия для выхода продуктов горения. Цилиндрический чугунный насадок выполнен с отверстиями диаметром 5 мм и шагом между отверстиями 10 мм (всего 1670 отверстий). Насадок изготовляется из жаропрочного серого чугуна марки СЧ 24-44. Наружную цилиндрическую поверхность насадка окаймляет сетка стабилизатора горения из нержавеющей (Ст. 1Х18Н9Т) или никромовой (Ст. Х20Н80) сталей с размером ячейки 0,63×0,63 мм и с коэффициентом живого сечения 0,48. Горелка снабжена электромагнитным клапаном с термопарой и запальником.

В ее комплект входят подставка, резино-тканевый рукав диаметром 14 мм и длиной 5 м, а также хомуты для крепления шланга. Преимуществом горелки КГ-16 является то, что она проста в изготовлении и устойчива к динамическим ударам и вибрации. Коэффициент ее излучения при номинальной тепловой нагрузке составляет около 70%.

Технические данные горелки КГ-16 следующие: расход природного газа 2,5 м³/ч; тепловая нагрузка 20 000 ккал/ч; количество тепла, передаваемого излучением 14 000—16 600 ккал/ч; количество тепла в продуктах сгорания 3000 ккал/ч; диаметр отверстия форсунки 4 мм; высота с подставкой наибольшая

1380 мм; наименьшая 1080 мм; давление газа 130 мм вод. ст.; диаметр туннеля топочной камеры 219 мм; общий вес 22 кг.

На рис. 49 показана горелка с металлическим излучателем О. Э. Буле. Она состоит из смесительной камеры 1, включающей воздухоподаватель 2 и газоподаватель 3, насадка 4, который прикреплен к верхней части смесительной камеры 1, и металлической сетки 5. Соты 6 насадка образованы перегородками 7, перпендикулярными к сетке 5. Воздух в смесительную камеру 1 всасывается потоком газа. Сгорание смеси осуществляется на сетке 5.

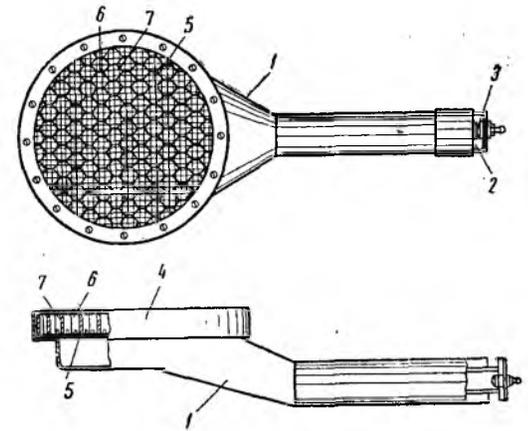


Рис. 49. Горелка инфракрасного излучения с металлическим излучателем сотообразного сечения в плане

На рис. 50 показана горелка с излучающей поверхностью 1, состоящей из двух слоев жаропрочной решетки. В корпусе 2 горелки установлена перфорированная диафрагма 3, разделяющая его на две камеры: выравнивающую 4 и смесительную 5. В центре диафрагмы равномерно распределены отверстия 6. Сбоку корпуса имеется смеситель 7, имеющий в сечении форму плоского прямоугольника. В расширяющейся входной части смесителя расположена газовая труба 8 с соплами 9 для выхода газа. Большая длина смесительной камеры дает возможность хорошо перемешивать газ с воздухом и выравнивать скорость потока и его давления по всему сечению камеры. В выравнивающей камере происходит дальнейшая подготовка смеси. Смесь проходит через излучающую решетку с равномерной ско-

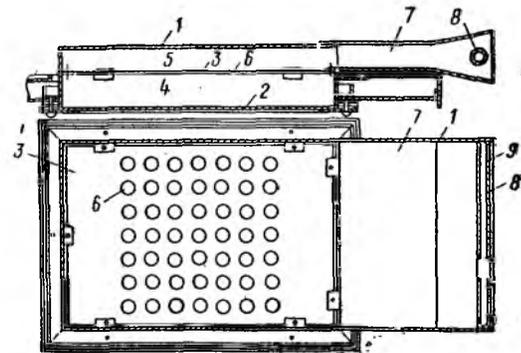


Рис. 50. Излучающая горелка с большой поверхностью излучения, состоящей из двух жаропрочных решеток

ростью и давлением, что обеспечивает равномерный нагрев излучающей поверхности.

На рис. 51 представлена горелка, обеспечивающая высокое качество газовоздушной смеси. Она состоит из корпуса 1, закрытого сверху плитой из прямоугольных сетчатых отражательных экранов 2, 3, 4 и взаимодействующего с ними излучающего экрана 5. Экраны изготовлены из проволоки никелевого сплава. При этом экраны 2 и 4 выполнены из более тонкой проволоки,

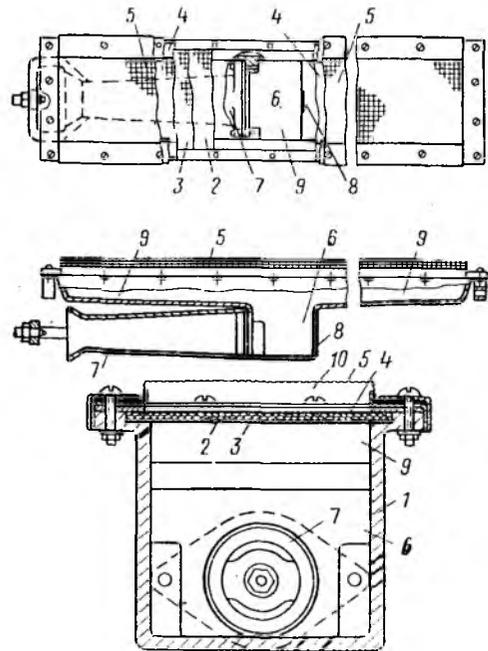


Рис. 51. Горелка с излучающей плитой из металлических сеток

чем экраны 3 и 5. Нижняя часть корпуса имеет впадину 6, к которой присоединяется смесительная трубка Вентури 7. При прохождении через нее газ и воздух частично перемешиваются и поступают во впадину, где газовоздушная смесь наталкивается на стенку 8.

Происходит завихрение смеси, способствующее наиболее глубокому ее перемешиванию перед входом в камеру 9. Смесь сгорает в камере 10. Некоторое количество тепла поглощается стенками корпуса и впадины. Смесительная трубка нагревается меньше, поскольку она расположена вне корпуса. Расширение газовоздушной смеси, поступающей во впадину в сочетании с турбулентностью, обеспечивает полное перемешивание газа с воздухом и равномерную подачу смеси по всей поверхности экрана 2 при одинаковом давлении. Это способствует равномерному нагреву излучающего экрана.

Можно накладывать металлические сетки одна на другую таким образом, чтобы проволоки одной решетки были расположены над клеточными промежутками другой. Это способствует более эффективному излучению и лучшему остыванию внутренней решетки. Внутреннюю поверхность головки горелки рекомендуется выполнять из алюминия, чтобы уменьшить излучение внутри горелки.

На рис. 52 и 53 изображены горелки с ветрозащитным устройством. Горелка (рис. 52) имеет смесительную камеру 1, которая закрывается излучающей плитой 2. Газ подается в камеру через форсунку 3, а воздух — по трубе 4. Продукты сгорания отводятся по трубе 5, расположенной в боковой стенке открытого кожуха 6. Горелка имеет рефлектор 7. Труба для подвода воздуха соединена с кожухом рефлектора, откуда засасывается воздух для горения. Давление ветра, действующее на внешнюю сторону горелочного насадка, через трубу 4 и смесительную камеру 1 передается и на внутреннюю сторону насадка. Для большего снижения отрицательного влияния ветра на горелку рефлектор 7 закрывают экраном из проволочной сетки 8, а патрубок для выхода продуктов сгорания защищают колпачком 9.

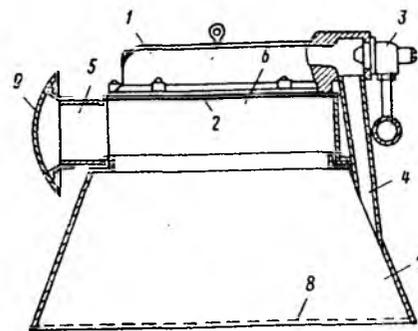


Рис. 52. Ветроустойчивая горелка с выравнивающим давление устройством

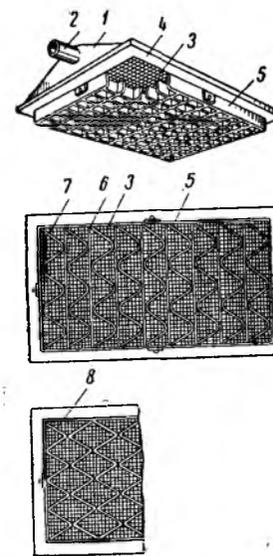


Рис. 53. Горелка с ветрозащитным приспособлением в виде глубокой решетки

Горелка (рис. 53) имеет корпус 1, смесительную трубку 2, излучающую поверхность 3 из двух мелких проволочных сеток, удерживаемую фланцем 4 и сотовую решетку 5 из стальных пластин. Размер сот 20—25 мм, высота пластин 15—25 мм. Такая конструкция решетки способствует свободному удалению продуктов сгорания от излучающей поверхности и препятствует действию бокового ветра. Нагреваясь за счет горячих газов, решетка становится дополнительным источником излучения. Степень нагрева пластин зависит от их толщины. Пластины толщиной 0,5 мм нагреваются до красного каления. Решетка выполняется из огнеупорного материала, не образующего окалины. Решетка может иметь и другую конструкцию: прямые 6 и волнистые 7 полосы свариваются точечной сваркой, в результате образуются ячейки треугольного сечения. Решетка может быть образована одними волнистыми полосами 8, которые соприкасаются вершинами.

Горелка (рис. 52) имеет корпус 1, смесительную трубку 2, излучающую поверхность 3 из двух мелких проволочных сеток, удерживаемую фланцем 4 и сотовую решетку 5 из стальных пластин. Размер сот 20—25 мм, высота пластин 15—25 мм. Такая конструкция решетки способствует свободному удалению продуктов сгорания от излучающей поверхности и препятствует действию бокового ветра. Нагреваясь за счет горячих газов, решетка становится дополнительным источником излучения. Степень нагрева пластин зависит от их толщины. Пластины толщиной 0,5 мм нагреваются до красного каления. Решетка выполняется из огнеупорного материала, не образующего окалины. Решетка может иметь и другую конструкцию: прямые 6 и волнистые 7 полосы свариваются точечной сваркой, в результате образуются ячейки треугольного сечения. Решетка может быть образована одними волнистыми полосами 8, которые соприкасаются вершинами.

Керамические чашечные и кольцеобразные горелки. Керамические радиационные горелки разделяют на однопроводные с подачей газовой смеси, приготовляемой в специальных смесителях, и двухпроводные с раздельной подачей газа и воздуха под давлением. В таких горелках сжигают газы с высокой и низкой теплотой сгорания. В керамических горелках газозвдушная смесь сгорает на раскаленной керамической (монокитной) поверхности. Коэффициент излучения керамической поверхности выше, чем у газового факела. Установки, оборудованные керамическими горелками, обеспечивают интенсивный нагрев и высокую производительность.

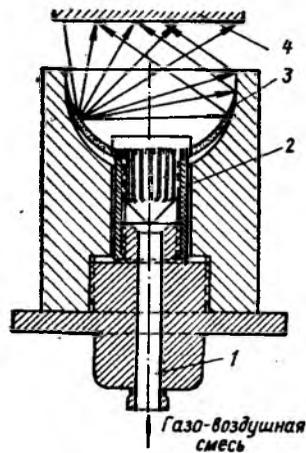


Рис. 54. Горелка с чашеобразным излучающим насадком, работающим на предварительно подготовленной газозвдушной смеси

1 — штуцер для подвода газозвдушной смеси; 2 — распределительный колпачок; 3 — чаша из огнеупорного материала; 4 — облучаемое изделие

пературе она становится мощным излучателем тепловой энергии. При необходимости получения восстановительной или нейтральной среды под распределительный колпачок (после разогрева чаши) подается газозвдушная смесь с $\alpha < 1$.

Чашеобразная горелка, показанная на рис. 55, предназначена для сжигания различных видов газообразного топлива. Излучающий насадок горелки выполнен из огнеупорного материала. На внутренней поверхности насадка 1 имеются концентрично расположенные впадины и выемки. Они создают устойчивое горение в широких пределах изменения давления газа. Распределительное устройство состоит из трубы 2 и наконечника 3, между которыми расположены лопатки 4, разбивающие поток газозвдушной смеси на отдельные струи.

На рис. 54 показана чашечная однопроводная горелка, распространенная в промышленности. Эта горелка выполнена в виде керамической чаши, в которую через распределительный керамический колпачок подается под давлением 2000 мм вод. ст. готовая газозвдушная смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,05$. Огнеупорная чаша и колпачок выполняются из смеси окиси алюминия и кремниевого ангидрида или других огнеупорных материалов, стойких к температурам до 1800°С. Стабильность горения достигается за счет омывания поверхности чаши струями газозвдушной смеси и высокой скоростью истечения этих струй (100 м/сек) из щелей колпачка. Температура на поверхности чаши составляет 1400—1500°С. При такой тем-

На рис. 56 показана другая распространенная за рубежом конструкция излучающей горелки, работающая на предварительно подготовленной газозвдушной смеси. Она отличается от рассмотренных горелок кольцеобразной формой насадка и регулирующим газораспределительным колпачком, изготовленным из жаропрочного чугуна. Эта горелка может работать на низком и среднем давлениях газа.

Горелки легко регулируются, но при работе примерно на 50% номинальной тепловой нагрузки температура насадка падает. Если горелки расположены в закрытых и сохраняющих тепло камерах, то понижение температуры, а следовательно, и уменьшение количества излученной ими энергии не так заметно, как при размещении горелок в открытом пространстве.

Такие горелки применяют в качестве отдельных излучателей или в виде панелей, состоящих из набора малых горелок, образующих сплошную излучающую поверхность. Керамические горелки получили широкое распространение в печах скоростного нагрева непрерывного действия, а также в туннельных печах.

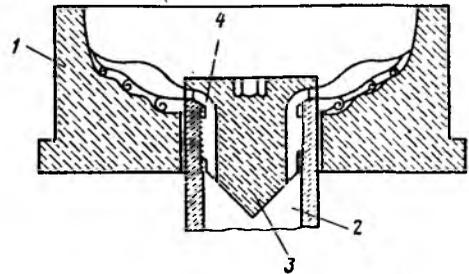


Рис. 55. Горелка с оребренным чашеобразным насадком

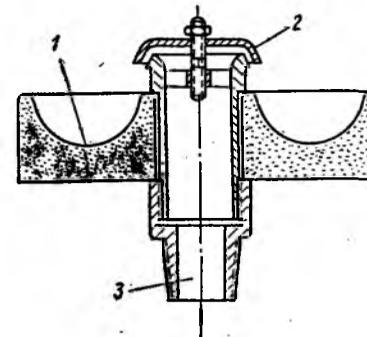


Рис. 56. Горелка с кольцеобразным насадком, работающая на предварительно подготовленной газозвдушной смеси

1 — чаша из огнеупорного материала; 2 — распределительный колпачок из жаростойкого чугуна; 3 — штуцер для подвода газозвдушной смеси

Панельные (блочные) горелки инфракрасного излучения. Чтобы передать тепло большим поверхностям, горелки собираются в блок — панели, между которыми помещают или транспортируют нагреваемые изделия. Инжекционная излучающая панельная горелка изображена на рис. 57. Она рассчитана на сжигание газа с теплотой сгорания около 13 000 ккал/м³. Газ из форсунки поступает в смеситель, газозвдушная смесь (с коэффициентом избытка воздуха в пределах 1,05—1,1) попадает в распределительную камеру. Далее по стальным трубкам газозвдушная смесь поступает в туннели, где сгорает, не образуя внешних факелов. Горелочные насадки (панели) изготавливаются

Далее по стальным трубкам газозвдушная смесь поступает в туннели, где сгорает, не образуя внешних факелов. Горелочные насадки (панели) изготавливаются

из керамических прямоугольных призм следующего состава (в % по объему): шамот класса А-70, латненская — гатненская глина 24—26, асбест 4—6. Керамика устойчива до 1700°С. Промежутки между собранными в панель призмами служат температурными швами, которые повышают термостойкость панели. Панельные излучающие горелки широко распространены для

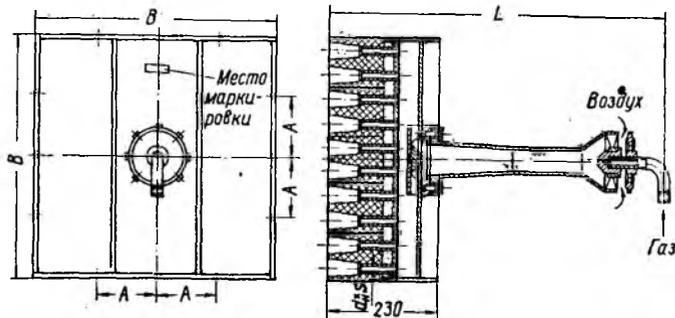


Рис. 57. Панельная излучающая горелка среднего давления типа ГБП

d_{II}^x — наружный диаметр трубки в мм; S — толщина стенки трубки в мм

нагрева трубчатых печей в нефтеперерабатывающей промышленности. Они также могут применяться и в топках котлов в виде подовых и стенных панелей и для сушил. Техническая характеристика инжекционной панельной излучающей горелки приведена в табл. 16.

Таблица 16
Техническая характеристика панельной излучающей горелки среднего давления типа ГБП

Шифр изделия	Тепловая нагрузка в ккал/ч	$d_{II}^x \cdot S$ в мм	Количество трубок в шт.	t в мм	L в мм	B в мм	A в мм	Вес в кг
ГБП-35	35 000	6 × 1	100	50	740	500	126	85
ГБП-55	55 000		144			605	150	110
ГБП-85	85 000	8 × 1,25	100	35,7	945	500	125	82
ГБП-120	120 000		144			605	150	108
ГБП-140	140 000	10 × 1,25	100	35,7	945	500	125	89
ГБП-200	200 000		144			605	150	124
ГБП-280	280 000	10 × 1,25	196	35,7	945	500	125	94
ГБП-400	400 000		289			605	150	131
ГБП-530	530 000	365	365	35,7	945	500	125	100

На рис. 58 представлена радиационная смесительная горелка системы Городова и Черкинского. Она может быть использована

для опаливания и сушки тканей. Горелки собираются из отдельных керамических блоков, которые устанавливаются на чугунном корпусе горелки, укрепленном на раме газоопаливающей машины. Эти горелки могут поворачиваться вокруг своей оси для автоматического или ручного отвода раскаленной поверхности в сторону от ткани. Газовоздушная смесь выходит через отвер-

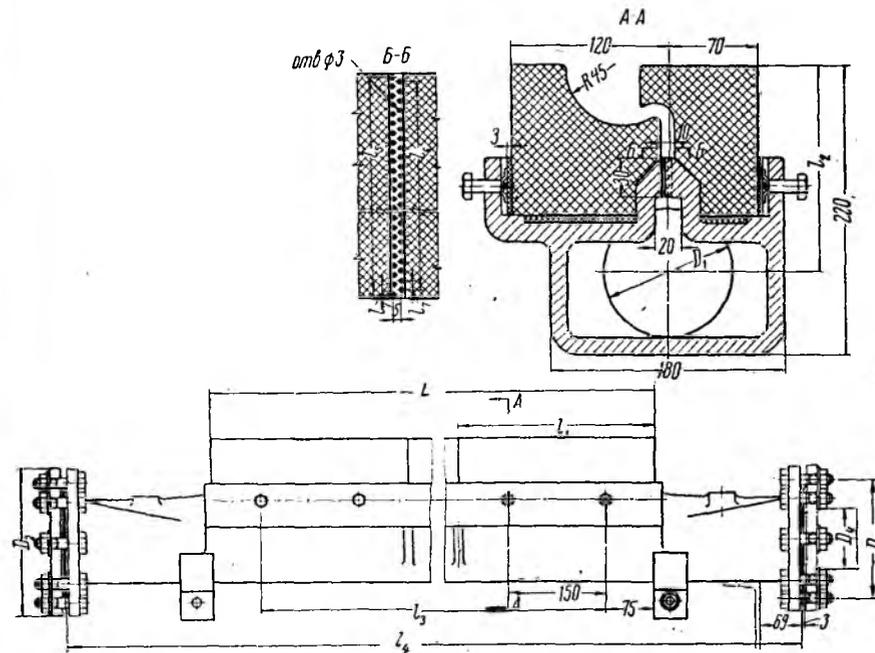


Рис. 58. Газовая радиационная горелка для опаливания тканей

стия диаметром 3 мм. Горелка работает в комплекте с двухпроводным инжекционным смесителем конструкции института Стальпроект. Газовоздушная смесь сжигается в щели, образуемой двумя рядами примыкающих друг к другу фасонных огнеупорных блоков. Продукты сгорания, выходящие из щели и камеры горения, омывают вогнутую поверхность огнеупорного отражателя и нагревают его до температуры, вызывающей тепловое излучение. Испытания радиационной горелки показали, что количество тепла, получаемого в виде лучистой энергии, составило до 56% в зависимости от температуры излучающей поверхности; плотность облучения — 150 000—202 000 ккал/м².

Габаритные размеры и техническая характеристика горелок приведены в табл. 17 и 18.

Инфракрасные излучатели с пористой керамикой. При использовании газа повышенного давления применяются излучаю-

Таблица 17

Габаритные размеры газовой радиационной горелки
для опаливания ткани в мм

Горелка	L	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	d	D _y	D ₁	D ₂	n в шт.	Вес кг
0341-01	2400	300	157	2250	2856	2394	2387	7	18	100	100	220	685	8
0341-02	1400	300	162	1260	1856	1380	1374	6	14	70	68	160	461	4

Таблица 18

Техническая характеристика газовой радиационной горелки
для опаливания ткани

Горелка	Тепловая нагрузка в ккал/ч	Природный газ $Q_H^P=8500$ ккал/м ³		Воздух		Вес в кг
		расход газа в м ³ /ч	давление газа в мм вод. ст.	расход при $\alpha=1,2$	давление перед сме- сителем в мм вод. ст.	
0341-01	160 000	18,8	0—80	240	400	188,8
0341-03	104 000	12,2	0—80	156	410	144,2

щие насадки, выполненные из жаропрочных пористых материалов, например керамики. В этом случае предварительно подготовленная однородная газовоздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha \geq 1$ проходит по отдельным порам, образующим систему узких искривленных каналов, заканчивающихся у поверхности расширенными камерами сгорания.

При поджигании смеси над холодной плитой образуется большое количество коротких факелов, которые при разогреве насадка на некоторую глубину становятся незаметными для глаза. Поверхность насадка при этом приобретает оранжевый цвет и становится источником теплового излучения. Схема излучающей горелки с керамическим пористым насадком приведена на рис. 59.

Экспериментальные исследования позволили установить, что пористый газопроницаемый керамический насадок можно применять для поверхностного сжигания природного и сжиженных углеводородных газов без проскока пламени, а испытания опытной горелки, оборудованной таким насадком, показали, что она устойчиво работает даже при порывах ветра со скоростью 9—11 м/сек. При горизонтальном расположении горелки (насадком вниз) и сжигании пропан-бутана ($Q_H^P = 22\,000$ ккал/м³) темпера-

тура наружной (излучающей) поверхности насадка достигла 1100—1200°С.

Механизм горения газообразного топлива на поверхности пористого газопроницаемого огнеупорного керамического насадка зависит от следующих факторов: а) химической кинетики газовых реакций в зоне горения и в предпламенной зоне; б) аэродинамики в зонах горения и распространения продуктов сгорания; в) теплообмена между зоной горения и огневой поверхностью насадка, а также между свежей газовоздушной смесью, продуктами сгорания и окружающей средой.

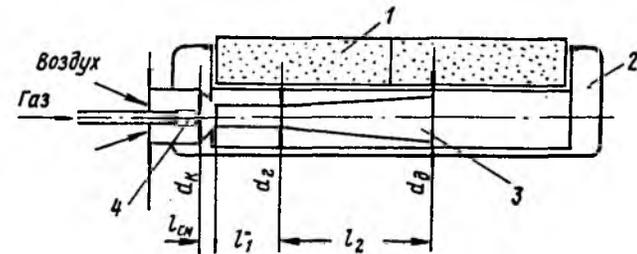


Рис. 59. Схема инжекционной горелки с пористым керамическим насадком

1 — пористый керамический насадок; 2 — корпус; 3 — смеситель; 4 — форсуника

Физико-техническая характеристика пористой керамики зависит от технологии ее изготовления (гранулометрический состав наполнителя, температура обжига, давление прессовки).

Физико-технические характеристики керамических масс, представляющих технический интерес, представлены в табл. 19.

Следует отметить, что для большинства испытанных керамических насадков из указанных масс температура тыльной стороны насадка при увеличении удельной тепловой нагрузки до 500—530 тыс. ккал/м²·ч постоянно уменьшается, что свидетельствует о преобладании скорости отвода тепла потоком газовоздушной смеси над скоростью подвода тепла из зоны горения. Увеличение теплоотдачи в проницаемом мелкозернистом насадке происходит по двум причинам: во-первых, увеличивается отношение поверхности пористой среды к объему; во-вторых, теплоотдача на единицу поверхности также увеличивается. Поэтому теплоотдача от фронта пламени растет до тех пор, пока распространение пламени становится невозможным. Размеры зерен (пор) должны быть такими, при которых пламя не может распространяться в глубину насадка. Разработанные пористые массы являются достаточно надежными огнепреградителями при невысоких температурах окружающей среды.

Анализ полученных теплотехнических и гидравлических характеристик с учетом показателей механической прочности поз-

воляет рекомендовать для внедрения керамические массы 4-3г и 16-5.

Таблица 19

Физико-технические показатели керамических масс

Шифр массы	Давление прессования в $\text{кгс}/\text{см}^2$	Температура обжига в $^{\circ}\text{C}$	Крупность зерна в мм	Влажность при прессовании в %	Водопоглощение в %	Теплопроводность в $\text{ккал}/\text{м}\cdot\text{град}\cdot\text{ч}$	Пористость в %	Объемный вес в $\text{г}/\text{см}^3$	Предел прочности на изгиб в $\text{кгс}/\text{см}^2$	Размер пор в мк	Огнеупорность в лк
1а	75	1350	3,5	7	5	1,37	13,5	2,29	—	350—420	167
1б	100	1350	2,15	—	—	—	16	—	—	—	—
2	100	1380	2,5	7,8	6	1,17	16,25	2,2	10,4	250—300	169
4-2	75	1380	2,25	7,7	8,7	1,26	18	—	7,5	126	—
4-3г	100	1440	2	7	8,9	1,06	20,73	1,95	12,4	210	—
11-в	100	1440	2	—	—	—	22	—	—	—	—
16-3	100	1350	—	15,1	23,1	0,69	30	—	15	—	167
16-5	100	1350	2,25	15	18,5	0,91	32,57	1,73	24,2	270	175
17-в	75	1350	2	4,5	10	1,01	21,98	1,92	28	270	165
18-3в	100	1350	2	11	10,5	0,81	17,5	2,04	21,6	—	165

В Польской Народной Республике разработана технология изготовления керамических пористых плиток, конструкция которых показана на рис. 60. Плитку изготовляют из смеси, состоящей из 2 частей серпентина, 4 частей глины и 1 части окиси алю-

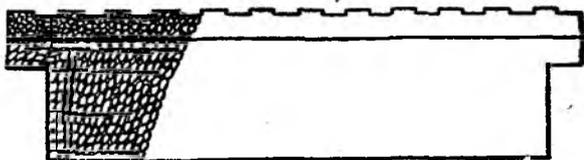


Рис. 60. Двухслойная пористая керамическая плитка

миния с добавлением в качестве катализаторов 2% Cr_2O_3 , 0,1% NiO . Смесь увлажняют, брикетируют, высушивают и обжигают при 1200—1300 $^{\circ}\text{C}$. Полученные брикеты дробят на зерна с гранулометрическим составом 0,8—5 мм, из которых отделяют фракции диаметром 2—4 и 0,8—1,3 мм. Зерна смешивают с вяжущим материалом, состоящим из смеси огнеупорной глины, серпентина и окиси алюминия в весовом отношении 5 : 3 : 2 с добавлением 40% воды. Из полученной массы прессуют керамические плитки. Крупнозернистый слой (80—85% толщины плитки) формируют из массы, содержащей 75% зерен диаметром 2—4 мм и 25% вя-

жущего материала. Мелкозернистый слой (15—20% толщины плитки) состоит из 80% зерен диаметром 0,8—1,3 мм и 20% вяжущей массы. Плитки прессуют в два этапа. Сначала спрессовывают крупнозернистую массу, а затем запрессовывают мелкозернистую массу под давлением 150—200 $\text{кгс}/\text{см}^2$. Сформованные плитки просушивают и обжигают при 1100—1300 $^{\circ}\text{C}$. Двухслойная плитка площадью 250 см^2 и толщиной 4 см при работе излучателя излучает 2000 $\text{ккал}/\text{ч}$. Природный газ и воздух подают под давлением 60—100 мм вод. ст. В этих условиях поверхность плитки нагревается до 1200—1300 $^{\circ}\text{C}$.

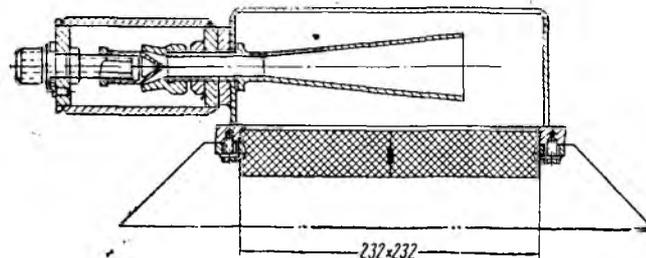


Рис. 61. Газовая горелка инфракрасного излучения среднего давления с пористым керамическим насадком

Равномерность зернистости керамического элемента является существенным фактором для безупречной и безопасной работы излучателя. Опасность проскока газа внутрь горелки может иметь место, если применяется керамика большой теплопроводности. В керамическую массу примешивают древесные опилки или мелкие частицы древесного угля; в результате обжига керамической плитки внутри не образуются искусственные поры, которые способствуют снижению теплопроводности керамики. Это дает возможность создать значительный температурный перепад.

Примером излучающей горелки с пористой керамикой может служить инжекционная горелка среднего давления с керамическим насадком конструкции института Ленгипроинжпроект (рис. 61).

Паровая фаза сжиженного газа подводится по трубе диаметром $1/2''$ к штуцеру, в котором установлена коническая форсунка с выходным отверстием 0,8 мм.

Струя газа после выхода из форсунки вместе с инжектируемым воздухом поступает в инжектор. Воздухорегулировочная шайба у горелки отсутствует.

Из инжектора газозвоздушная смесь поступает в камеру размером 90×244×244 мм. В камере имеется отверстие, в котором установлены четыре керамические плитки, склеенные между со-

бой составом из жидкого стекла и порошкообразного шамота. Размер каждой керамической плитки $115 \times 115 \times 40$ мм.

Состав массы для приготовления плиток следующий: кварцевые отходы (фракции 9—30 $отв/см^2$) — 82%; доломит бегунного помола — 1%; полевой шпат — 1%; пиритовые огарки — 5%; спиртовая барда — 3,5%; известковое молоко — 7,5%.

Каждая плитка имеет большое количество мельчайших отверстий (диаметр 0,05—0,2 мм), имеющих хаотичное расположение и конфигурацию каналов. Живое сечение отверстий составляет в среднем 30% всей огневой поверхности плитки. Насадок горелки нагревается до температуры 1000—1100° С при темпера-

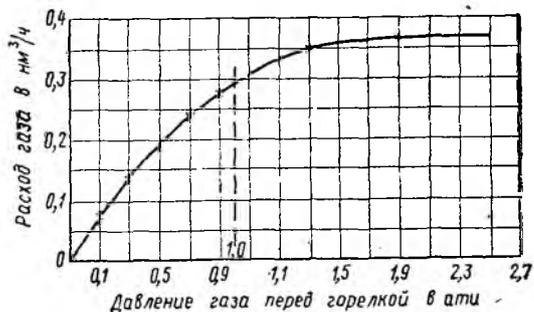


Рис. 62. Зависимость изменения расхода газа от давления его перед горелкой

туре окружающей среды 20° С. Следует отметить, что количество отверстий на каждом квадратном сантиметре площади огневой поверхности насадка неодинаково, что приводит к неравномерному распределению температуры по его поверхности во время работы горелки.

Проведенные испытания горелки (рис. 62) показали следующие основные результаты.

1. При изменении давления газа перед горелкой от 0,1 до 1,6 $кгс/см^2$ расход газа увеличивается от 0,07 до 0,33 $м^3/ч$. Нижний предел проскока пламени в камеру газозвдушной смеси наблюдается в режиме горения, характеризующемся величиной давления газа 0,2 $кгс/см^2$. Верхний предел проскока пламени не наблюдался, так как горелка работала устойчиво в диапазоне изменения давления от 0,2 до 2,5 $кгс/см^2$. При давлениях газа свыше 1,5 $кгс/см^2$ расходная характеристика имеет пологий характер, т. е. расход газа в этой области давлений изменяется очень незначительно.

2. В диапазоне колебания давления газа от 0,5 до 2,5 $кгс/см^2$ коэффициент избытка воздуха изменяется в пределах 1,48—0,8. Оптимальная величина избытка воздуха, соответствующая мак-

симальной температуре излучающей поверхности насадка и равная 1,03—1,05, наблюдается при давлении газа перед горелкой 0,95—1 $кгс/см^2$.

3. Полученная графическая зависимость кроме выявления количественной характеристики тепловой работы насадка позволяет сделать два вывода:

а) вследствие незначительного повышения температуры огневой поверхности излучателя при изменении тепловой нагрузки поддерживать давление газа перед горелкой выше 1 $кгс/см^2$ нецелесообразно;

б) для сокращения продолжительности разогрева излучателя и выведения его в стабильное тепловое состояние рационально осуществлять пуск горелки в работу в первые 15 мин при давлении газа 2—2,5 $кгс/см^2$ с последующим снижением давления газа до 1 $кгс/см^2$. При этом продолжительность разогрева излучателя сокращается более чем на 40%. Тепловая нагрузка должна колебаться в пределах 6370—7030 $ккал/ч$ при давлении газа перед горелкой 1—1,5 $кгс/см^2$.

4. Изменение давления газозвдушной смеси перед насадком толщиной 40 мм колеблется в пределах от 0 до 9,5 $мм вод. ст.$ при изменении давления газа перед горелкой 0—3 $кгс/см^2$.

На основании произведенных испытаний горелки инфракрасного излучения имеют следующие характеристики: тепловая нагрузка 6370—7030 $ккал/ч$; давление газа перед горелкой 1—1,5 $кгс/см^2$; коэффициент избытка воздуха в камере газозвдушной смеси 0,95—1,05; температура огневой поверхности керамического насадка 800—900° С; скорость прогрева насадка до указанной температуры 18—20 мин; содержание окиси углерода в неразбавленных продуктах горения ($\alpha=1$) под рефлектором горелки колеблется в пределах 0—0,006%; давление газозвдушной смеси в камере горелки перед насадком 5—7 $мм вод. ст.$; давление среды под рефлектором горелки составляет 0,4—2 $мм вод. ст.$

Примером излучающей горелки с пористой керамикой может служить приведенная на рис. 63 горелка для бытовых плит. Отличительной особенностью данной горелки является возможность

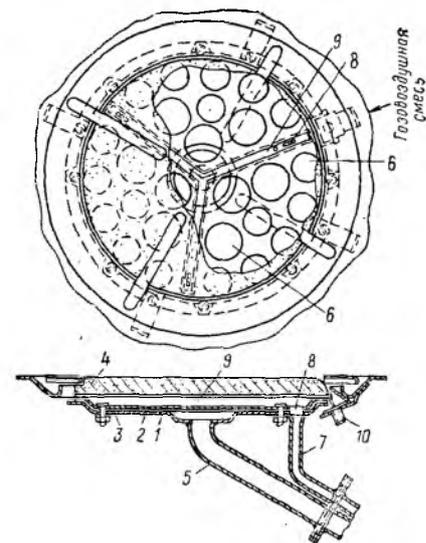


Рис. 63. Излучающая горелка с пористой керамикой для бытовых плит

переключения ее на основной и дополнительный (малый) нагрев. Корпус 1 блюдобразной формы с распределительной пластиной 2 образует камеру 3, сообщающуюся через отверстия в распределительной пластине 3 с нижней стороной излучающего насадка 4 из пористого керамического материала. Распределительная пластина служит для регулирования подачи горючей смеси через насадок горелки. Из основного трубопровода 5 газоздушная смесь стехиометрического состава подается под распределительную пластину и через отверстия 6 подходит к внутренней поверхности насадка. Отверстия имеют различный диаметр, что способствует равномерному распределению газозвушной смеси по насадку.

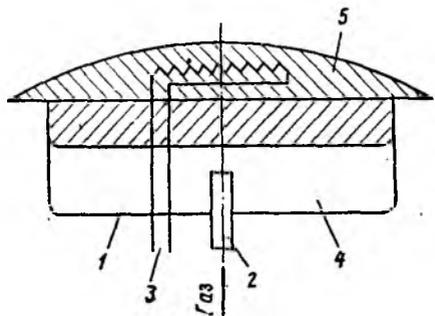


Рис. 64. Схема газового каталитического излучателя

1 — корпус; 2 — форсунка; 3 — электрические нагреватели; 4 — газовая камера; 5 — огнеупорный насадок

При малом нагреве накал остается столь же сильным, но уменьшается площадь нагрева. Горючая смесь в этом случае подается по дополнительному каналу 7 и через отверстия 8 поступает в каналы 9 распределительной пластины. Каналы соединены в центре и расходятся радиально. Таким образом, смесь проходит к ограниченному участку насадка и нагревает только его. Располо-

жение каналов обеспечивает равномерное распределение тепла по дну посуды. Горелка зажигается от запальника 10 через каналы. При нормальной работе горелка включена на основной и дополнительный нагревы.

За рубежом также распространен газовый каталитический излучатель. Он сжигает газ при температуре 100—400°С. Излучатель состоит из пористой асбестовой массы, которая пропитана катализатором. Электрический элемент нагревает часть асбестового слоя пока не произойдет поджигание газозвушной смеси. При поверхностной температуре 400°С достигается максимум излучения длиной волны ~4,25 мк. При минимальной температуре около 100°С длина волны составляет примерно 7,7 мк. Каталитический излучатель дает очень мягкое излучение, которое при сушке растительных и животных материалов предохраняет их от разложения. Излучатель применяется для технологических процессов во взрывоопасных помещениях.

На рис. 64 показана схема газового каталитического излучателя. Удельная тепловая нагрузка такого излучателя составляет 1 ккал/см²·ч. Температура поверхности около 400°С. Производительность его можно регулировать путем изменения давления газа.

В установках для каталитического обогрева в США используется один или несколько нагревателей. Газозвушная смесь сгорает на поверхности каталитических активных сеток, изготовленных из жаростойких сплавов, покрытых палладием, платиной, осмием, родием, рутением или иридием. Температура сетки 400°С. Предварительный подогрев их осуществляется обычными газовыми горелками.

Трубчатые излучатели. Одной из разновидностей газовых инфракрасных излучателей являются так называемые радиационные трубы или трубчатые излучатели, которые широко применяются в промышленных печах для термической и термохимической обработки деталей косвенным нагревом в контролируемых газовых средах. Нагрев этих труб производится продуктами сгорания от газовых горелок, помещенных внутри их. Такими излучателями оборудуются печи в металлообрабатывающей и машиностроительной промышленности.

Отличительными особенностями современной промышленной печи является оснащение ее механизмами с автоматическим управлением и регулированием тепловых параметров, контролем и регулированием состава среды, в которой происходит нагрев.

Существуют два типа промышленных, радиационных печей: муфельные, в которых обрабатываемые изделия помещаются в муфель, заполненный соответствующей газовой средой и обогреваемый снаружи, и с радиационными (излучающими) трубами, внутри которых сжигается газ. Эти трубы обладают большой поверхностью теплоотдачи. Они располагаются в рабочем пространстве печи, заполненном контролируемой газовой средой.

Печи с контролируемыми газовыми средами могут быть самых разнообразных типов. Выбор схемы печи зависит от технологических требований.

Технико-экономический анализ подтверждает целесообразность применения радиационных труб. Радиационные трубы изготовляются из жароупорной стали, а также из карборунда.

Условия сжигания газа в таких трубах значительно отличаются от обычных условий. Сложность заключается в том, что здесь не представляется возможным более или менее полностью учесть влияние аэродинамических факторов на теплообмен. Отсюда все расчеты, основанные только на данных теплового и материального баланса, являются приближенными.

Существуют два способа сжигания газа для получения равномерного нагрева по всей длине трубы.

1. Один из компонентов горения (горючий газ или воздух) подводится целиком в начале излучающей трубы, а другой — отдельными частями вдоль трубы.

2. Газ и воздух подводятся в начале излучающей трубы. При этом с теплотехнической точки зрения имеет существенное значение, какой газ подводится целиком и какой отдельными порциями.

При втором способе смешение компонентов и процесс горения в трубе регулируются или подбором скоростей движения с таким расчетом, чтобы обеспечить полноту сгорания газа только к самому концу трубы, или применением разных смешивающих приспособлений, расположенных на отдельных участках трубы.

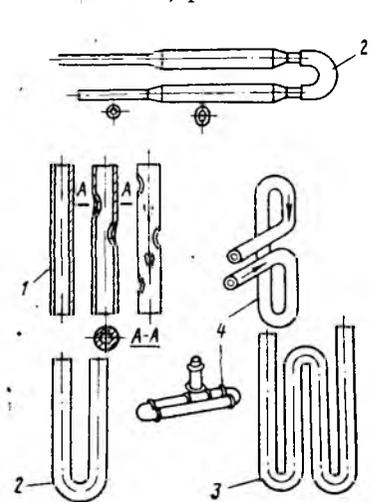


Рис. 65. Формы излучающих труб

1 — прямая; 2 — U-образная; 3 — W-образная; 4 — кольцевая

Существуют самые разнообразные конструкции излучающих труб. Наиболее распространенные из них прямые, V и W-образные и кольцевые. Располагаются трубы в печах горизонтально и вертикально.

На рис. 65 показаны различные формы излучающих труб, а на рис. 66 — радиационная кольцевая труба с рециркуляцией продуктов горения. Каждая излучающая труба имеет свою горелку.

Равномерный нагрев трубы в значительной степени зависит от качества смешения газа с воздухом, т. е. от конструкции газовой горелки. Горелка выбирается в зависимости от способа сжигания газа, величины давления газа и воздуха, режима теплообмена при технологическом процессе. Конструкция горелки должна обеспечить:

а) равномерную температуру стенки трубы по всей ее длине при экономичном сжигании газового топлива; б) удобство монтажа, эксплуатации и ремонта; в) безопасность работы и широкий предел регулирования теплопроизводительности.

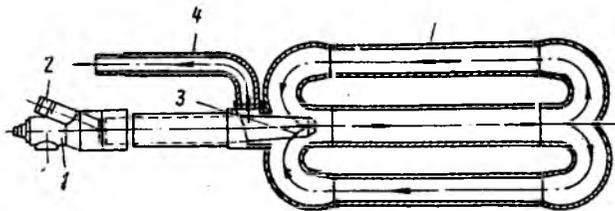


Рис. 66. Излучающая кольцевая труба с рециркуляцией продуктов сгорания

1 — основная горелка; 2 — вспомогательная горелка; 3 — краевой горелки; 4 — отвод продуктов сгорания; 5 — излучающая труба

Для излучающих труб могут применяться как инжекционные, так и двухпроводные горелки с принудительной подачей воздуха. Эти горелки могут быть с предварительным частичным

или полным смешением газа с воздухом. При эксплуатации горелок с частичным предварительным образованием газовой смеси вторичный воздух подается дутьевым устройством или подсасывается тяговой установкой.

Для обогрева излучающих труб термических печей рекомендуется использовать горелки с частичным предварительным образованием газозвдушной смеси.

Температура поверхности излучающих труб термической печи составляет 900—1000°С и выше.

Ввиду тяжелых температурных условий эксплуатации нагревательных труб срок службы излучающих труб, даже из жаростойкой стали, не превышает 6—8 месяцев. Поэтому радиационные трубы необходимо предохранять от перегрева на любом участке их длины. Режим горения газа должен быть таким, чтобы температура трубы была несколько ниже максимально допустимой. Для предохранения трубы от перегрева можно рекомендовать так называемое растяжение факела по длине трубы.

Существуют два способа увеличения длины факела: 1) диффузионное горение (в радиационную трубу подаются недостаточно перемешанные газ и воздух) и 2) подача газозвдушной смеси с недостатком воздуха (дополнительный вторичный воздух за пределами горелки поступает непосредственно в трубу).

Однако применение этих способов снижает к. п. д. установки и ухудшает условия работы выходного конца излучающей трубы, заделанного в кладку.

Изменение температуры продуктов сгорания и стенки излучающей трубы в зависимости от типа горелки и длины трубы показано на рис. 67.

Были предприняты попытки выравнять температуру по длине трубы путем устройства специальных вмятин на ее поверхности усиливающих турбулизацию потока и вызывающих мест-

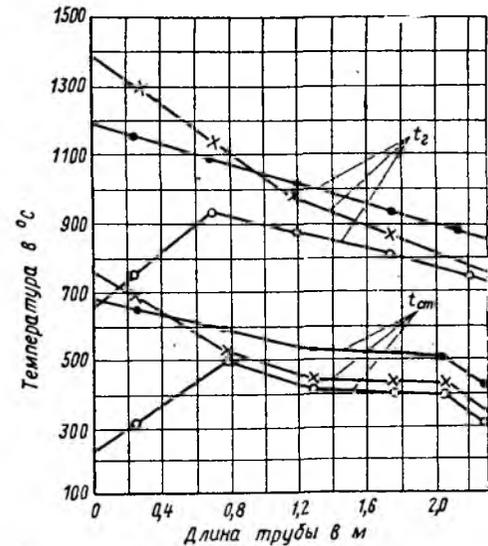


Рис. 67. Изменение температуры продуктов горения в излучающей трубе t_r °С и температуры стенки трубы t °С в зависимости от типа горелки и длины трубы

ное увеличение скорости движения продуктов сгорания. Создана конструкция вертикальной излучающей трубы с вмятинами на ее поверхности (рис. 68).

К сожалению, результаты эксплуатации этой конструкции излучающей трубы выявили низкий к. п. д. и значительную неравномерность температуры по ее длине ($\Delta t = 150^\circ \text{C}$).

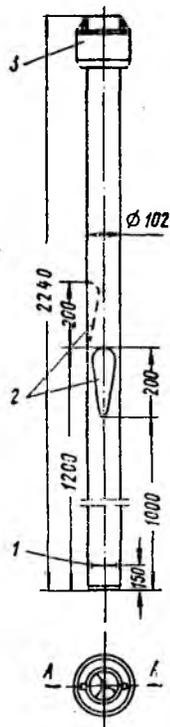


Рис. 68. Вертикальная излучающая труба с вмятинами

1 — труба; 2 — вмятины;
3 — воротник для входа в песочный затвор

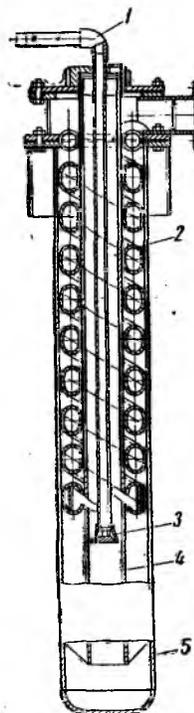


Рис. 69. Тупиковая recuperative излучающая труба

1 — газопровод; 2 — спиральный recuperator; 3 — газовая горелка; 4 — внутренняя труба; 5 — излучающая труба

В зоне прохода трубы через свод печи наблюдался ее перегрев.

Инженерные поиски привели к созданию тупиковой recuperative излучающей трубы (рис. 69), в которой удалось получить более равномерный нагрев излучающей поверхности ($\Delta t = 60^\circ \text{C}$).

Recuperative трубчатый излучатель состоит из внутренней (пролетной) и внешней (тупиковой) труб. Внутренняя

труба имеет зону наивысшей температуры в начальном участке, а внешняя труба — в конечном.

Суммарный эффект теплоотдачи от потока продуктов сгорания и от излучения внутренней трубы дает незначительное изменение температуры стенки внешней трубы. Однако температура внутренней трубы на начальном участке оказывается более высокой, чем в чисто пролетной трубе. Двойная труба

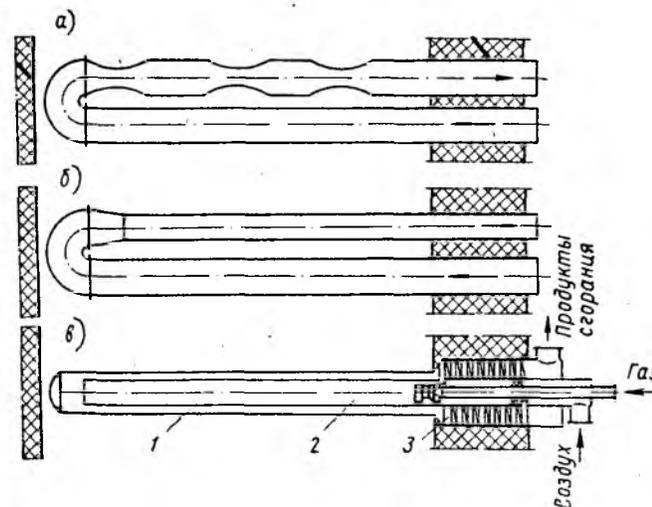


Рис. 70. Способы увеличения теплоотдачи от газов к стенке трубы и recuperative излучающая труба

а — сплющивание обратной ветви U-образной трубы; б — уменьшение диаметра обратной ветви U-образной трубы; в — recuperative радиационная труба: 1 — внешняя тупиковая труба; 2 — внутренняя пролетная труба; 3 — воздушный recuperator

имеет змеевиковый recuperator для подогрева поступающего воздуха за счет тепла выходящих из кольцевого пространства продуктов сгорания.

Recuperator размещается непосредственно у головки трубы.

На рис. 70 также показаны способы увеличения теплоотдачи от продуктов сгорания к стенкам излучающей трубы и выравнивания температур на ее поверхности. Для предупреждения порчи стенок печи и самой излучающей трубы она (труба) не имеет заделки второго конца в кладку.

На рис. 71 представлены два варианта излучающих труб с рециркуляцией продуктов горения: однокольцевая и двухкольцевая с односторонним креплением. Эти трубы не нарушают герметичность печи при разогреве, не требуют сальникового устройства и позволяют значительно увеличить эффективность

использования газового топлива за счет удвоенной длины и рециркуляции продуктов сгорания.

Теплонапряженность излучающей поверхности однокольцевой излучающей трубы при сжигании $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ природного газа составляет $20\,124 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, двухкольцевой — $13\,158 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

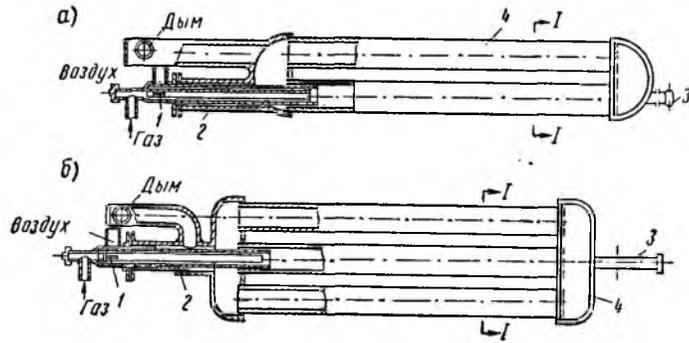


Рис. 71. Излучающие трубы с рециркуляцией продуктов сгорания

а — схема однокольцевой излучающей трубы; б — схема двухкольцевой излучающей трубы; 1 — подвижное сопло горелки; 2 — корпус горелки; 3 — глазок; 4 — излучающая труба

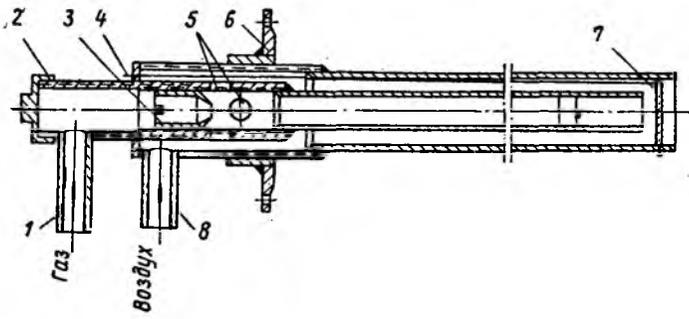


Рис. 72. Схема горелки для одно- и двухкольцевых излучающих труб

1 — трубка подачи газа; 2 — пробка; 3 — передвижное газовое сопло; 4 — вывод питания электрозапальника; 5 — отверстия для подсоса первичного воздуха; 6 — крепежный фланец; 7 — электрозапальник; 8 — труба для подвода вторичного воздуха

Для увеличения равномерности нагрева труб целесообразно увеличивать кратность рециркуляции продуктов сгорания.

На рис. 72 изображена конструкция горелки, рекомендуемая для указанных выше труб. Горелка предусматривает регулирование длины факела изменением соотношения первичного и вторичного воздуха путем осевого перемещения газового сопла.

Для выравнивания температуры стенки излучающей трубы по ее длине иногда применяют вторичные излучатели в виде вставок различного сечения, размещающихся внутри трубы. Вторичный излучатель получает тепло от потока продуктов сгорания за счет конвекции и излучения трехатомных газов, в результате чего его температура оказывается в интервале между температурами газов и стенки трубы. Все полученное тепло

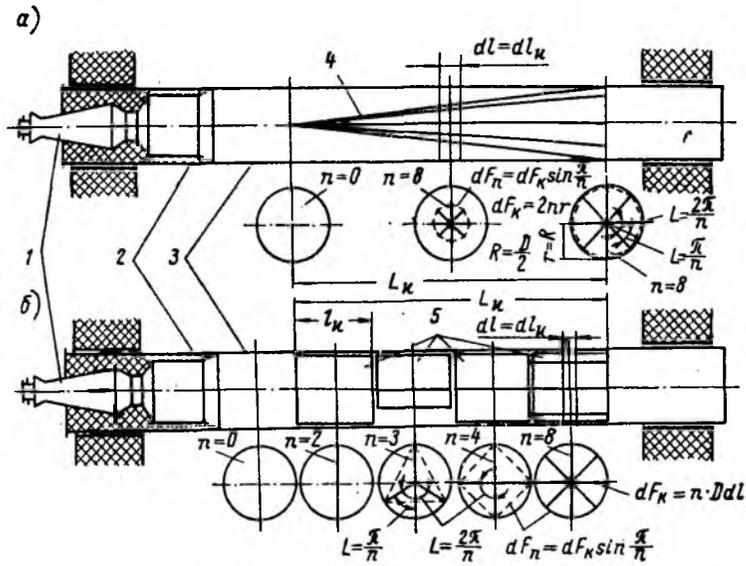


Рис. 73. Излучающая труба с вторичными излучателями переменной поверхности

а — вставка с непрерывно увеличивающейся поверхностью теплообмена; б — вставка со ступенчатым изменением поверхности теплообмена; 1 — газовая горелка; 2 — защитный огнеупорный слой; 3 — излучающая (радиационная) труба; 4 — вставка с непрерывно увеличивающейся поверхностью; 5 — ступенчатые вставки

вторичный излучатель передает окружающей поверхности, т. е. стенке трубы. Теплоотдача стенке (от потока газов) при этом увеличивается за счет уменьшения эквивалентного диаметра сечения и повышения скорости потока. Дополнительное тепло составляет 20—50% теплоотдачи основного потока продуктов сгорания и зависит от конвективной поверхности вторичного излучателя, его эффективной радиационной поверхности и степени черноты системы «излучатель — стенка».

Меняя конвективную и радиационную поверхности излучателя, можно обеспечить постоянство суммарного количества передаваемого тепла даже при снижении температуры продуктов сгорания по длине трубы.

Для решения этой задачи была предложена излучающая труба со встроенным вторичным излучателем, теплообменная поверхность которого увеличивается по длине трубы по мере уменьшения температуры газов.

Сжигание газового топлива в излучающей трубе должно осуществляться с помощью индивидуальной для каждой трубы

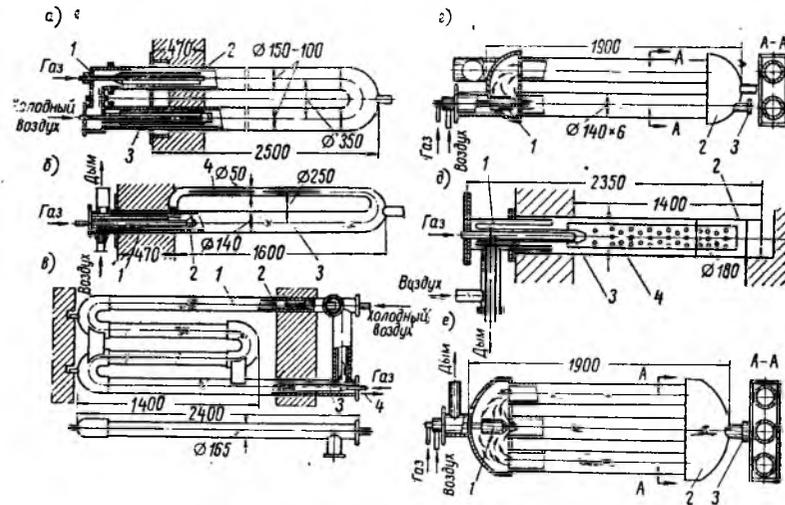


Рис. 74. Радиационные трубчатые нагреватели

- а — U-образная радиационная труба: 1 — окно для ввода газового запальника; 2 — горелка с периферийной подачей воздуха; 3 — рекуператор
 б — P-образная радиационная труба: 1 — рекуператор; 2 — стабилизатор факела; 3 — основная топочная труба; 4 — труба для отвода продуктов сгорания
 в — W-образная радиационная труба: 1 — корпус радиационной трубы; 2 — рекуператор; 3 — газовая горелка; 4 — газовый запальник
 г — однокольцевая радиационная труба с рециркуляцией продуктов горения: 1 — горелка; 2 — радиационная труба; 3 — соединительная камера
 д — тупиковая рекуперативная радиационная труба: 1 — рекуператор; 2 — внешняя излучающая труба; 3 — горелка; 4 — внутренняя перфорированная труба
 е — двухкольцевая радиационная труба с рециркуляцией продуктов горения: 1 — горелка; 2 — радиационная труба; 3 — окно для ввода запальника

газовой горелки полного предварительного смешения, обеспечивающей беспламенное горение. В данном случае процесс горения завершается на расстоянии 3—8 диаметров от устья горелки. При этом коэффициент избытка воздуха не превышает 1,03—1,05.

Конструкция излучающей трубы с двумя вариантами вторичных излучателей представлена на рис. 73. Для этих излучателей (вставок) характерно неравенство конвективных и эффективных радиационных поверхностей теплообмена.

В конвективном теплообмене участвует полная геометрическая поверхность излучателя. При этом эффективная радиац-

онная поверхность примерно равна внешней поверхности условного охватывающего многоугольника.

На основании опытов можно рекомендовать для излучающих труб диаметром 70—110 мм устанавливать вторичные излучатели на расстоянии 500—550 мм от устья горелки, включая длину обмурованной части (200—250 мм). При ступенчатом исполнении вторичных излучателей длина каждой ступени не должна превышать 250 мм. В нагревательных печах при беспламенном сжигании газового топлива необходимо устанавливать излучающие трубы с обмурованными начальными участками.

На рис. 74 показаны радиационные трубчатые нагреватели, разработанные институтом газа АН УССР. Технические данные указанных радиационных нагревателей приведены в табл. 20.

Рассмотрим систему уравнений теплообмена, позволяющих найти необходимые площади вторичного излучателя. Суммарная теплопередача от газов и излучателя к стенке на единицу ее длины (ккал/м·ч) определяется по формуле

$$Q' = Q + \Delta Q,$$

где Q — тепло, передаваемое от потока газов стенке трубы на единицу длины трубы (ккал/м·ч), определяемое по формуле

$$Q = \alpha f (T_g - T),$$

где α — суммарный коэффициент теплоотдачи от потока газов стенке трубы в ккал/м²·ч·град;

f — поверхность нагрева трубы на единицу длины в м²/м;

T_g — температура продуктов сгорания в °К;

T — температура стенки трубы в °К;

ΔQ — дополнительное количество тепла, передаваемого от вторичного излучателя к стенке трубы (ккал/м·ч), определяемое по формуле

$$\Delta Q = 4,9 \epsilon f_n \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right],$$

ϵ — степень черноты системы излучатель — стенка;

f_n — эффективная радиационная поверхность излучателя на единицу длины в м²/м;

T_n — температура излучателя в °К.

С другой стороны, для установившихся условий

$$\Delta Q = \alpha_n f_k (T_g - T_n) = 4,9 \epsilon f_n \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right],$$

где α_n — суммарный коэффициент теплоотдачи от газов к излучателю в ккал/м²·ч·град;

Таблица 20
Основные технические данные радиационных трубчатых нагревателей

Показатели	Прямая		Тупиковая	U-образная	P-образная	W-образная	С рециркуляцией горения	
	горизонтальное расположение	вертикальное расположение					однокольцевая	двухкольцевая
Рабочая длина трубы в мм . . .	500—1000	1500—2000	1500	2000	1800	1500	1900	1900
Рабочая температура в °С . . .	940	920	880	960	920	950	880	900
Оптимальный расход природного газа в м ³ /ч	5	7	6	9	6	14	6	8
Оптимальное давление газа перед горелкой в мм вод. ст. . .	3000	3000	400	350	370	420	600	600
Оптимальное давление воздуха перед горелкой в мм вод. ст.	—	—	380	400	400	500	440	460
Максимальная температура подогретого воздуха в °С	—	—	400	300	450	310	—	—
Коэффициент использования топлива в трубе	0,4	0,45	0,7	0,65	0,7	0,7	0,65	0,7

f_k — конвективная поверхность излучателя в м²/м, следовательно

$$Q' = \alpha f (T_r - T) + \alpha_n f_k (T_r - T_n) = \alpha f (T_r - T) + 4,9 \epsilon f_n \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right].$$

Каждая схема сечения вторичных излучателей, приведенных на рис. 73, характеризуется определенной зависимостью между конвективной и радиационной поверхностями, т. е.

$$f_n = \varphi(f_k).$$

За конвективную поверхность (f_k) следует принимать полную геометрическую поверхность излучателя, а за эффективную радиационную (f_n) — внешнюю поверхность условного охватывающего многоугольника.

Между конвективной f_k и эффективной радиационной f_n поверхностями теплообмена существует зависимость

$$f_n = f_k \sin \frac{180^\circ}{n} = f_k \sin \frac{\pi}{n},$$

где n — число лучей.

Величина n при плавном изменении поверхности излучателя (см. рис. 73, а) f_k остается постоянной при ступенчатом изменении (см. рис. 73, б), f_k — переменна и может меняться от 2 до ∞ .

Поверхность конвективного теплообмена излучателя f_k определяется из следующих соотношений:

а) для ступенчатого излучателя

$$f_k = \sum_1^m n D l_n,$$

где m — число ступеней излучателя;

n — число лучей в ступени (величина переменная в пределах всего излучателя, но постоянная для каждой из m ступеней);

D — диаметр радиационной трубы в м;

L_n, l_n — длины всего излучателя и ступени излучателя.

$$L_n = \sum_1^m l_n;$$

б) для плавного излучателя

$$f_k = \frac{nD}{2} L_n;$$

где D — диаметр радиационной трубы в м;

L_n — длина излучателя в м;

n — число лучей (постоянная величина).

Приближенный расчет схем и поверхностей излучателей по длине трубы производят в следующем порядке.

1. Длина радиационной трубы делится на 4—6 участков и из условий равномерной теплоотдачи определяется средняя температура продуктов сгорания на каждом участке.

2. Определяются значения Q' и Q на каждом участке.

3. Находят значения $f_k; f_n; T_n$ на каждом участке.

Результаты расчета одной из труб приведены на рис. 75.

В радиационных трубах вторичный воздух подается в зону сжигания воздушным эжектором или вентилятором. При этом создаются условия для «растянутого» факела горения.

Газовоздушная смесь выходит из кратера горелки со значительными скоростями (20—50 м/сек). Для создания устойчивого горения без отрыва пламени (в условиях относительно холодных поверхностей в зоне горелочных устройств) требуется непрерывно действующий источник зажигания у корня горячей газовоздушной смеси. Он создается за счет отвода части основного потока газовоздушной смеси к выходу центральной струи из носика горелки.

Устойчивость горения может обеспечить также и вспомогательная горелка с независимой подачей газа или его смеси

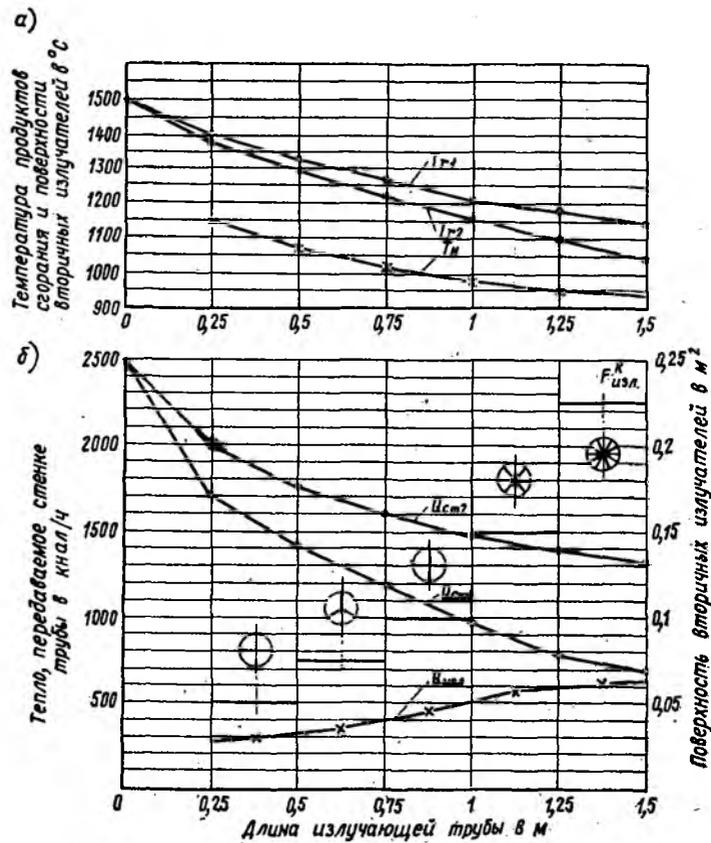


Рис. 75. Изменение температуры продуктов сгорания, температуры поверхности вторичных излучателей и теплоотдачи по длине излучающей трубы

а — $T_{г1}$ — температура продуктов сгорания в трубе без вторичных излучателей; $T_{г2}$ — температура продуктов сгорания в трубе с вторичными излучателями; $T_{и}$ — температура поверхности вторичных излучателей; б — $Q_{ст1}$, $Q_{ст2}$ — тепло, передаваемое стенке трубы без излучателей и с излучателями; $Q_{изл}$ — тепло, передаваемое стенке вторичными излучателями; $F_{изл}^к$ — конвективная и излучающая поверхности вторичных излучателей (в окружностях показаны сечения вторичных излучателей по длине излучающей трубы)

с воздухом. Эта горелка будет непрерывно поджигать смесь, выходящую с большой скоростью из основной горелки.

При подаче природного газа в центр вертикально расположенной трубы горение его заканчивается примерно на длине 30 диаметров трубы. Распределение температуры по длине получается достаточно равномерным. Для того чтобы горение закончилось на длине 12 диаметров трубы, воздух, необходимый

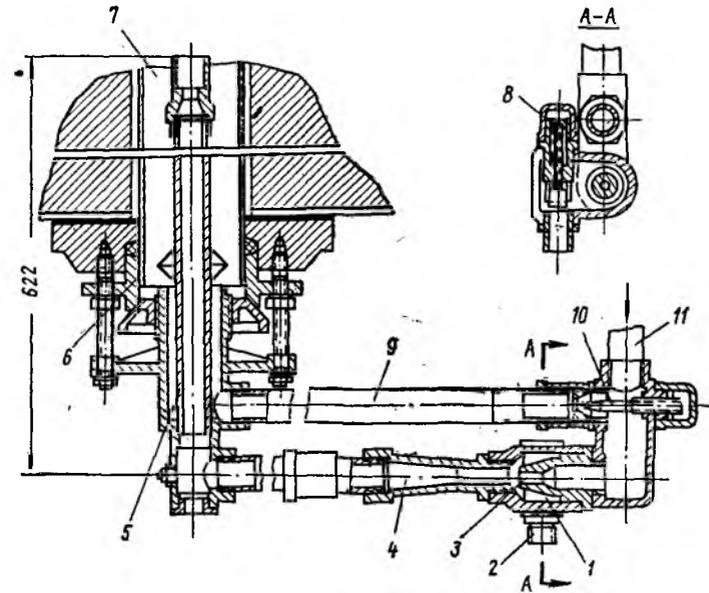


Рис. 76. Газовая горелка с активной воздушной струей и регулированием количества принудительно подаваемого вторичного воздуха

1 — газовая камера; 2 — газопровод; 3 — воздушная форсунка; 4 — смеситель; 5 — трубопровод газозвушной смеси; 6 — радиационная труба; 7 — стабилизатор горения; 8 — регулятор подачи газа; 9 — трубопровод вторичного воздуха; 10 — регулятор вторичного воздуха; 11 — воздухопровод

для сгорания газа, следует разделить на первичный и вторичный. Проведенные опыты показывают, что оптимальной является подача первичного воздуха в количестве $\sim 50\%$ ($\alpha_{перв} = 0,5$). Газозвушную смесь ($\alpha = 0,5$) можно получить в инжекционных горелках с активной газовой или воздушной струей.

При конструировании газовых горелок для радиационных труб необходимо учитывать стабилизацию горения в низкотемпературной среде при высоких скоростях истечения газозвушной смеси из кратера горелки.

На рис. 76 показана горелка с активной воздушной струей для вертикальной радиационной трубы, в которой стабилизация

горения осуществляется путем подсоса внешней поверхности факела вторичного воздуха. Стабилизатор устойчиво работает при скорости истечения газозвушной смеси 0,5—15 м/сек. Такая скорость соответствует требованиям практики.

При сжигании в трубе 2,5 м³ газа скорость газозвушной смеси в трубе составляет 4—5 м/сек, число $Re=2000 \div 2500$. Ламинарный характер движения в трубе затрудняет смешение газа с воздухом и не обеспечивает полноту горения. Для турбулизации потока оказалось необходимым сужать сечение трубы путем вмятия стенок в определенных местах на глубину примерно

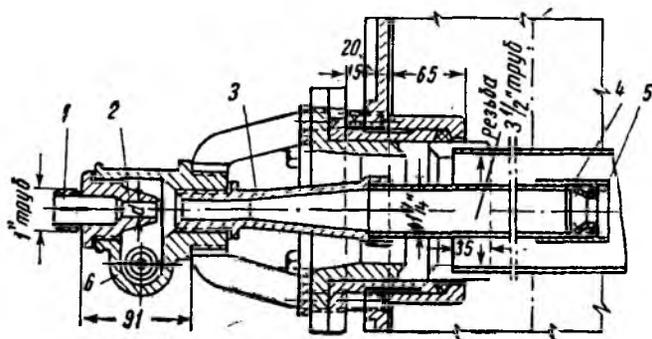


Рис. 77. Горелка для горизонтальной радиационной трубы с эжекцией газа воздухом

1 — подвод воздуха; 2 — воздушная форсунка; 3 — смеситель первичной газозвушной смеси; 4 — кольцевая камера газового запальника; 5 — кратер; 6 — игольчатый клапан для отладки подачи газа

0,5 ее диаметра. Оптимальное число вмятин (2—3) расположено на расстоянии 800—1000 мм от начала излучающей части трубы.

При выборе конструкции газовой горелки для пролетной вертикально расположенной трубы следует учитывать необходимость разделения воздуха на первичный и вторичный в пропорции 1:1, наличие самотяги в трубе, величину разрежения в начале трубы (1 мм вод. ст.) и создаваемую за счет этого разрежения скорость (3—4 м/сек).

На рис. 77 показана горелка для горизонтальной радиационной трубы с использованием газа низкого давления. Газ подается через нуль-регулятор и инжектируется воздухом. Воздух через исполнительный механизм поступает одновременно в горелку и в воздушный эжектор для отсоса продуктов сгорания. Это обеспечивает подсос вторичного воздуха в зону горения.

Для установки в тупиковых радиационных трубах можно использовать горелку, изображенную на рис. 78, которая обеспечивает довольно равномерный нагрев трубы по ее длине.

Для определения допустимых тепловых напряжений на излучающей поверхности радиационной трубы можно рекомендовать графики А. Д. Свинчинского (рис. 79). При определении величины допустимых тепловых напряжений на излучающей поверхности трубы следует учитывать и тепловые напряжения на объем трубы. Максимальная величина теплового напряжения, при которой удается полностью сжечь газ в объеме трубы,

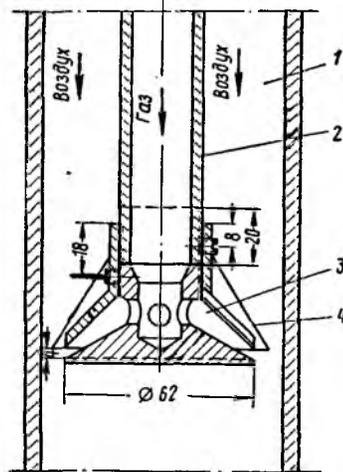


Рис. 78. Газовая горелка для тупиковой радиационной трубы

1 — кольцевая щель для выхода воздуха; 2 — газопровод; 3 — щель для выхода газа; 4 — завихряющая лопатка

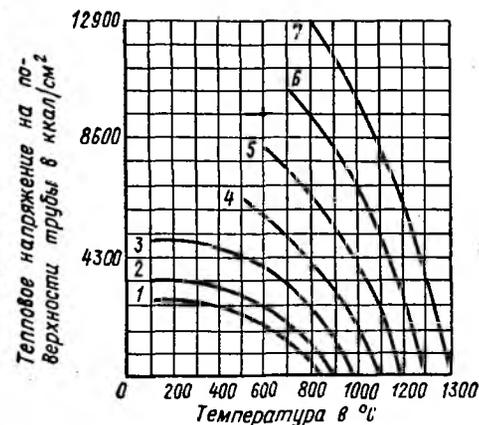


Рис. 79. График зависимости допустимых удельных поверхностных тепловых нагрузок на излучающую трубу от температуры нагрева стали в защитной атмосфере в °C

1 — $t_{\text{н}}=850^{\circ}\text{C}$; 2 — $t_{\text{н}}=900^{\circ}\text{C}$; 3 — $t_{\text{н}}=1000^{\circ}\text{C}$;
4 — $t_{\text{н}}=1100^{\circ}\text{C}$; 5 — $t_{\text{н}}=1200^{\circ}\text{C}$; 6 — $t_{\text{н}}=1250^{\circ}\text{C}$;
7 — $t_{\text{н}}=1300^{\circ}\text{C}$

составляет 3 млн. ккал/м³·ч. Превышение этой величины приведет к выбросу из трубы факела, что недопустимо.

Черные излучатели с обогреваемой стенкой. Черные излучатели представляют коробки или туннели с двойными стенками, между которыми размещены газовые горелки или движутся продукты сгорания, обогревающие внутреннюю стенку. Внешняя стенка изолирована для уменьшения потерь тепла в окружающую среду. Излучающая поверхность (стенка) нагревается до температуры 400—500° C.

К черным излучателям относится, в частности, излучатель типа PL-600 (рис. 80). Излучающей его частью является чугунная плита, снабженная с наружной стороны вертикальными ребрами, увеличивающими поверхность теплопередачи от дымовых газов. Задняя стенка камеры теплоизолирована. В нижней части камеры размещена инжекционная горелка низкого

давления, которая нагревает чугунную плиту по всей ее поверхности. Зажигание излучателя производится от электроспиралью мощностью 100 вт, работающей от сети напряжением 24 в.

Основные технические данные: расход природного газа — 0,36 м³/ч; давление газа — 175 мм вод. ст.; максимальная излучающая тепловая нагрузка — 1500 ккал/ч; максимальная температура поверхности — 500°С; размеры излучателя — 650×330×

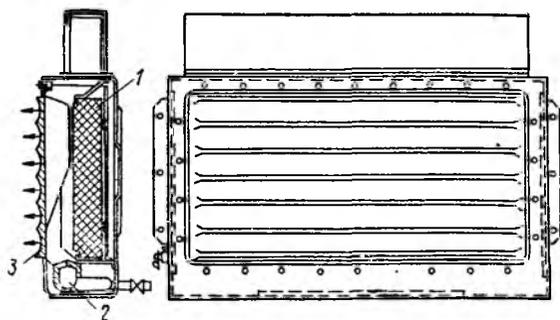


Рис. 80. Черный инфраизлучатель PL-600

1 — изоляция; 2 — горелка; 3 — излучающая панель

×88 мм; размеры излучающей плиты — 600×200 мм; вес — 22 кг.

Черный инфракрасный излучатель описываемого типа предназначен для технологических целей. Топочное пространство отделено от рабочего, поэтому он может применяться во взрывоопасной среде.

ГЛАВА III

ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛООВОЙ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

1. ПОГЛОЩЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

При расчете и проектировании радиационных установок с использованием газовых горелок необходимо учитывать прежде всего спектральную характеристику излучающего насадка (панели) трубки и терморрадиационные (оптические) свойства облучаемых материалов (поглощаемость, отражаемость и пропускательность лучистого потока в зависимости от его длины волны и толщины слоя материала, а также селективность).

В общем случае рекомендуется подбирать излучатели с максимумом энергии излучения, совпадающим с максимумом по-

глощения ее материалом при данных длинах волн. Однако при этих условиях материал должен иметь наименьшую отражательную и пропускательную способности.

Если облучается тонкий слой материала, находящийся на подложке, например лакокрасочное покрытие, то в этом случае следует выбрать такой спектр излучения генератора (излучателя), при котором пленка материала будет иметь максимум пропускания, а подложка — максимум поглощения.

В этом случае за счет излучения в основном будет нагреваться подложка, а от нее — пленка (путем кондукции).

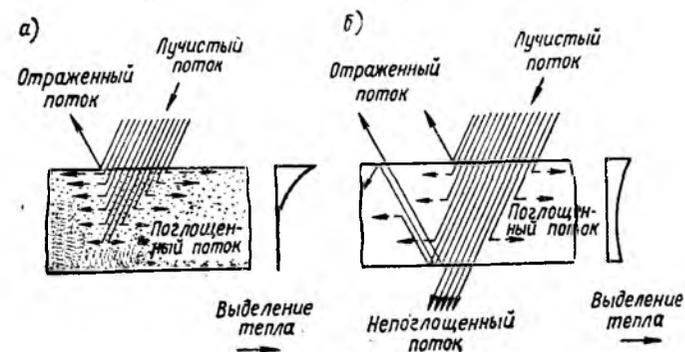


Рис. 81. Схема поглощения лучистого потока внутри однородного слоя материала

а — сильное поглощение; б — слабое поглощение

На рис. 81 показана схема распределения лучистого падающего потока на однородный слой материала. В первом случае, когда тело обладает высокой лучепоглощательной способностью (рис. 81, а), лучистый поток, падающий на тело, частично отражается его поверхностью, частично (в большей степени) поглощается внутри тела. В этом случае наиболее интенсивно нагреваются верхние слои тела. Причем, чем меньше теплопроводность тела, тем сильнее будут нагреты его верхние слои (считая от облучаемой поверхности). Во втором случае (рис. 81, б), когда тело обладает невысокой поглощательной способностью, часть лучистого потока будет отражена внешней поверхностью тела, часть — граничным слоем (тело — воздух), которая в свою очередь, отразившись, возвратится в толщу тела, а оставшаяся часть потока пройдет сквозь тело. В данном случае температура на облучаемой стороне будет несколько выше, чем на противоположной, однако внутри слоя температура будет ниже, чем на его границах.

На рис. 82 представлена схема распределения лучистого потока в двухслойном (неоднородном) теле. При высокой пропу-

скаательной способности первого слоя (рис. 82, а) и высокой поглотительной способности второго (подложки) лучистый поток частично отражается на границах первого слоя и частично поглощается вторым слоем (подложкой из стали), нагревая его. В этом случае температура у необлучаемой поверхности первого слоя (у облучаемой поверхности второго слоя) будет значительно выше, чем у облучаемой поверхности первого слоя. На некоторой глубине этого слоя температура будет меньше, чем

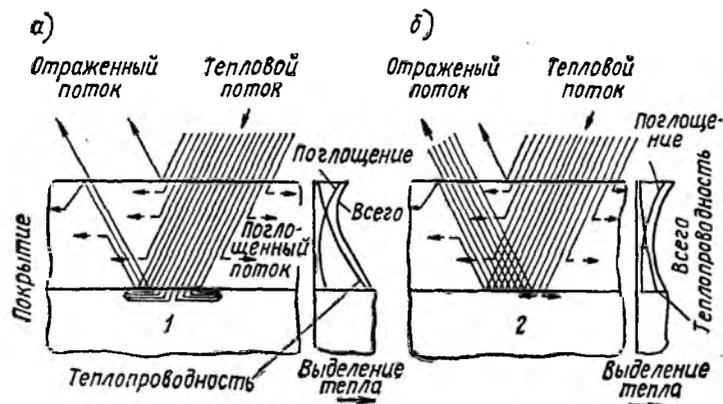


Рис. 82. Схема распределения лучистого потока, падающего на неоднородный (двухслойный) материал

а — сильное поглощение вторым слоем; б — слабое поглощение вторым слоем
1 — поверхность черная (сталь); 2 — поверхность блестящая (алюминий)

на его границах. Во втором случае (рис. 82, б), когда подложка обладает высокой отражательной способностью, например из алюминия, нагрев ее будет значительно медленнее, чем в первом случае, поэтому и температура на границе первого и второго слоев будет также меньше.

Из рассмотренных примеров следует, что при лучистом нагреве материалов с высокой пропускательной способностью их нужно помещать на подложке с высокой поглотительной способностью. При подложках из алюминия (с высокой отражательной способностью) необходимо либо перед нанесением покрытия обрабатывать поверхность подложки пескоструйными аппаратами или травлением (для увеличения шероховатости), либо увеличивать интенсивность облучения, если не удастся подобрать излучатель с соответствующим спектром излучения.

Для толстых материалов рекомендуется применять излучатели со спектром, хорошо пропускаемым и мало отражаемым данным материалом, чтобы обеспечить более глубокое проникание излучения в материал.

В качестве примера на рис. 83 показаны кривые пропускательной и отражательной способности коллоидального капиллярно-пористого тела в зависимости от длины волны и кривые спектрального излучения кварцевых трубчатых излучателей ($T = 1425^\circ \text{K}$ и $T = 2250^\circ \text{K}$).

Из рисунка видно, что области максимального пропускания материала соответствует и область максимального отражения. Выбор излучателя должен производиться в зависимости от технологии обработки материала. При необходимости интенсивной

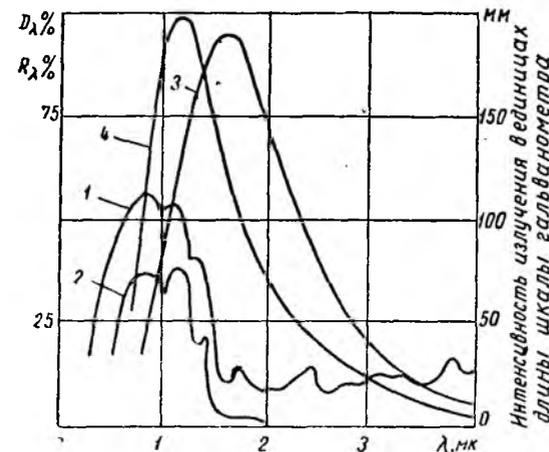


Рис. 83. Спектральные характеристики материалов и излучателей

1 — отражательная способность макаронного теста R_λ ; 2 — пропускная способность D_λ теста; 3 — спектр излучения генератора при $T = 1425^\circ \text{K}$; 4 — то же, при $T = 2250^\circ \text{K}$

обработки поверхности материала целесообразно принять излучатель 3, у которого максимум излучения приходится на область минимального отражения и пропускания материала. При обеспечении прогрева материала по глубине (толщине) следует принять излучатель 4, максимум излучения которого приходится на область высокой пропускаемости материала.

Исследованиями установлено, что общая отражательная способность материалов снижается с уменьшением их влажности, поэтому целесообразно в процессе сушки менять температуру излучателей. Это положение, однако, нельзя распространять на излучатели, в которых газ сжигается в объемных керамических или металлических сетках, так как эти излучатели из условий устойчивости и полноты горения газа не позволяют менять температуру излучающего насадка.

2. ГЛУБИННОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

Поглощение инфракрасных лучей материалами происходит не только с поверхности, но и на некоторую глубину, причем на глубину проникания лучей наряду с плотностью падающего на тело лучистого потока, оптическими свойствами и селективностью тела оказывает влияние и форма тела. Например, при облучении цилиндра наибольший эффект достигается при наружном облучении, что обусловлено большей лучевоспринимающей поверхностью.

Для проводников электричества (металлов) как непрозрачных тел глубина пропускания инфракрасных лучей очень мала и составляет не более $1/400$ длины волны (Р. Поль). По данным Э. Эккерта, пропускательная способность этих материалов составляет не более 1%.

Строительные и огнеупорные материалы обладают также незначительной пропускательной способностью.

Для обеспечения более интенсивного нагрева и сушки материалов необходимо, чтобы поверхностные слои их имели высокую пропускательную способность и зона максимальной температуры достигала наибольшей глубины.

Исследованиями установлено, что при длине волны излучения около 0,8 мк пропускательная способность воды достигает 80%, а при длине волны $\lambda = 1$ мк она составляет в зависимости от толщины слоя около 60%. При длине волны более 1,3—1,4 мк вода становится практически непроницаемой, так как полностью поглощает излучение с такой длиной волны.

Проницаемость многих материалов увеличивается с уменьшением длины волны излучения и уменьшается с увеличением толщины слоя. Для материалов с увеличенной влажностью проницаемость снижается. Лед толщиной 3 мм пропускает до 25% коротковолнового излучения.

3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ГАЗОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Накопленный опыт в проектировании и эксплуатации установок с инфракрасными газовыми излучателями позволяет дать некоторые рекомендации по применению горелок для тепловой обработки. При этом надо отметить, что многие положения для установок, оборудованных электрическими инфракрасными излучателями, справедливы и для установок с газовыми излучателями. Однако к установкам с газовыми излучателями предъявляются дополнительные специфические требования.

1. Если отсутствуют исходные данные по тепловой обработке заданного материала, то проектным работам должны предшествовать экспериментальные исследования и испытания опытных установок для определения оптимальных режимов условий

процесса (расстояние от горелок до обрабатываемого изделия, расстояние между горелками, равномерность распределения теплового потока, требуемая температура на поверхности изделия, продолжительность нагрева, воздухообмен и т. д.).

2. К газовым горелкам инфракрасного излучения должно подаваться стабильное номинальное давление газа. В противном случае, при колебании давления газа перед горелками, будет меняться температура на излучающих панелях и как следствие увеличиваться время или ухудшаться как качество тепловой обработки, так и сгорания газа.

3. Для регулирования плотности (интенсивности) излучения инфракрасных горелок, скомпонованных в отдельные группы, рекомендуется устраивать либо индивидуальное, либо групповое включение (выключение) их с таким расчетом, чтобы в каждой группе включалось (выключалось) одинаковое число горелок, т. е. изменение интенсивности излучения происходило без изменения направления его.

Не следует допускать включения (выключения) целой группы горелок, сосредоточенных в одном месте по излучающей поверхности тепловой установки, так как это приведет к неравномерному облучению обрабатываемого изделия (материала).

При черных излучателях интенсивность излучения регулируется за счет изменения их температуры путем изменения тепловой нагрузки горелок.

4. При проектировании установок конвейерного типа должно быть изучено прерывное и непрерывное облучение изделия. Первый способ (в целом ряде случаев) обеспечивает значительную экономию газа и улучшает технологический режим тепловой обработки.

В этих установках, кроме того, следует предусматривать резерв по длине зоны облучения, чтобы иметь возможность в случае необходимости облучать изделия (материалы) на большем отрезке пути его движения.

5. Необходимо обеспечить регулирование расстояния между инфракрасными излучателями и материалом. Особенно важно предусмотреть это в установках тепловой обработки открытого типа, а также в установках с одиночными или небольшими групповыми излучателями.

6. Горелки инфракрасного излучения могут устанавливаться внутри камеры и в ее окнах.

При установке инжекционных горелок внутри камеры необходимо обеспечить подвод воздуха к горелкам по специальным каналам. Необходимо также обеспечить отвод продуктов сгорания от горелок. Если выполнить каналы не представляется возможным, то в камере, где установлены горелки, должно быть обеспечено достаточное количество воздуха для горения с учетом возможности работы горелок при повышенных температурах воз-

духа. В противном случае может нарушиться нормальная работа горелок.

7. Обшивка внутри камер не должна коробиться при нагреве, так как при короблении ее часть излучения будет отражена в ненужном направлении, а при наличии в установке вентиляции с принудительной подачей воздуха будут создаваться нежелательные отклонения потока и завихрения, отрицательно влияющие на работу горелок.

8. Расположение излучающих насадок (панелей) горелок в установке должно обеспечивать равномерный тепловой поток, сосредоточенный на обрабатываемом изделии. Исключением могут быть установки для тепловой обработки изделий с неравномерной массой. В этих случаях облучение более массивных частей изделия должно быть более интенсивным.

В случае облучения плоских объектов с большой поверхностью достаточно обеспечить облучение их с одной или с двух сторон плоскости. При облучении пространственных объектов коробчатой формы необходимо, чтобы излучение было равномерным со всех сторон. При облучении предметов круглой формы может быть принято одно из решений: а) излучатели располагают вокруг изделия; б) изделие вращают вокруг своей оси.

9. При установке горелок инфракрасного излучения со сгоранием газа на керамических или металлических насадках внутри камер, учитывая, что от 45 до 55% тепла уходит с отходящими газами, необходимо использовать это тепло, применив одновременно лучистый и конвективный способы нагрева.

В этом случае горелки следует располагать под обрабатываемыми изделиями, обеспечив, однако, условия невозможности повреждения и засорения насадков горелок падающим материалом и воспламенения горючего материала, если он имеется.

10. При облучении изделий боковыми панелями, отсосе нагретого воздуха из верхней зоны и поступлении свежего воздуха снизу необходимо учитывать неравномерность нагрева воздуха по высоте камеры.

Для компенсации этой неравномерности нижние горелки должны обеспечивать большую интенсивность облучения изделия, чем верхние. Поэтому горелки рекомендуется объединять в группы, расположенные по горизонтали.

При движении облучаемого изделия вдоль камеры оно должно свободно подвешиваться на транспортере. Это дает возможность избежать затемнения облучаемых поверхностей деталями транспортера и устранить непроизводительные потери тепла на их нагрев.

11. Внутренние поверхности камеры целесообразно облицовывать листовым алюминием, который повышает равномерность облучения изделия и экономичность установки, что имеет большое значение при облучении объектов со сложной геометрической формой и низкой поглощательной способностью.

12. Чем меньше теплопроводность материала, тем более равномерно он должен облучаться, так как в этом случае не происходит выравнивание температуры через теплопроводность.

13. В установках, в которых может возникнуть большая концентрация пара, появляется опасность конденсации влаги на стенках камеры (печи). Поэтому камера перед подачей в нее материала должна быть предварительно прогрета так, чтобы внутренние ее части приобрели достаточно высокую температуру.

14. Инфракрасная тепловая обработка может вестись как в закрытых камерах или печах, так и в открытых установках на конвейерах или в стационарных условиях. Тепловая изоляция камер или печей не является необходимой, кроме тех случаев, когда требуется интенсифицировать процесс тепловой обработки.

15. К горелкам, смонтированным в установках, должен быть обеспечен свободный доступ для производства необходимых ремонтных работ или замены горелок.

16. В закрытых установках с инфракрасной тепловой обработкой следует устраивать специальные смотровые окна, необходимые для наблюдения за работой горелок.

17. В закрытых камерах или туннелях, в которых возможно выделение горючих и взрывоопасных растворителей, недопустимо наличие «мертвых» зон для воздухообмена.

18. В инфракрасных установках большое значение имеют температура и скорость поступающего в камеру воздуха. При поступлении холодного воздуха или воздуха с большой скоростью продолжительность тепловой обработки увеличивается.

Применение газовых инфракрасных излучателей дает возможность использовать горячие продукты сгорания и подавать в установку подогретый воздух. Подогрев воздуха до требуемой температуры происходит в специальных воздухоподогревателях или в системе рециркуляции.

19. Каждая установка с инфракрасными газовыми излучателями должна оборудоваться системой автоматики безопасности и необходимыми контрольно-измерительными приборами.

Автоматика безопасности должна предусматривать отсечку подачи газа в случаях выключения приточно-вытяжной вентиляции, падения давления газа ниже допустимой величины, остановки транспортеров; дистанционное управление зажиганием должно обеспечивать невозможность пуска газа до включения системы зажигания.

В тех случаях когда горелки находятся в местах, труднодоступных для наблюдения за их работой, они должны оборудоваться системой автоматики, контролирующей работу каждой горелки. При выключении горелок в результате возникновения аварийных ситуаций автоматика должна предусматривать включение горелок только оператором после устранения неисправностей, вызвавших отключение газа.

20. Транспортные устройства в инфракрасных установках (транспортные ленты, сетчатые ленты, решетки, колосники, сита и стеллажи) являются балластом, на нагрев которого расходуется тепло. Поэтому при проектировании и постройке таких установок должны приниматься меры для уменьшения этого балласта. В необходимых случаях транспортные устройства должны располагаться под дном (полом) или в верхней части сушильной камеры с устройством узкой щели для пропуска стоек или подвесок, на которых крепятся нагреваемые изделия. Следует помнить, что металлические детали транспортных устройств, находящиеся в поле излучения, нагреваются и излучают тепло. Поэтому при решении некоторых задач инфракрасного нагрева это следует использовать. Например, при выпечке печеня на стальных листах дополнительный нагрев желателен.

21. В других случаях, например при сушке пищевых продуктов, он может представлять опасность вследствие местного перегрева. В подобных случаях надо применять в качестве подложки подходящие материалы с малой поглощательной способностью.

22. Недопустимо пропускать через инфракрасную установку одновременно толстые и тонкие, тяжелые и легкие детали, так как неизбежны температурные различия.

23. При сушке лакокрасочных покрытий на толстых, массивных металлических телах вначале следует использовать облучение при больших тепловых напряжениях, так как в этом случае можно ускорить процесс сушки. Поскольку тепло, выделившееся с поверхностного слоя подложки, передается в глубь металла, то даже при сильном облучении не следует опасаться превышения температуры в слое лакокрасочного покрытия.

24. Массивные, тяжелые и толстостенные металлические тела, на которых необходимо высушить лакокрасочное покрытие, нагреваются очень медленно, зато и охлаждаются они также очень медленно. Последним обстоятельством можно воспользоваться, не сразу охлаждая материал холодным воздухом, после того как была достигнута температура запекания или полимеризации покрытия. Такое очень постепенное охлаждение, в процессе которого вначале сохраняется еще довольно высокая температура слоя лакокрасочного покрытия, способствует повышению его прочности. Только когда температура станет ниже определенного значения, можно применить искусственное охлаждение. В установках с транспортной лентой для выполнения этого требования между зоной сушки и зоной охлаждения должна иметься промежуточная зона со спокойным воздухом.

25. Чем сложнее конфигурация изделий, тем труднее получить равномерный нагрев при радиационной тепловой обработке. Поэтому необходимо одновременно использовать радиационный и конвективный режим тепловой обработки.

26. При сушке и тепловой обработке изделий инфракрасными лучами следует иметь в виду, что для каждого продукта должен быть разработан свой технологический режим. Существенную роль при этом играет способность нагреваемого изделия поглощать, пропускать и отражать лучи с различной длиной волны (селективность).

Ниже при рассмотрении конкретных решений по применению горелок инфракрасного излучения для различных тепловых работ будут дополнительно излагаться соображения по рациональному использованию излучателей.

4. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ УСТАНОВОК С ГАЗОВЫМИ ИНФРАКРАСНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Расчет и проектирование тепловых установок с газовыми горелками инфракрасного излучения могут выполняться в следующей последовательности.

1. Определяются основные теплотехнические и технологические параметры установки (температура нагрева обрабатываемых материалов, скорость технологического процесса, масса материала, его физико-химические свойства — поглощение, отражение и пропускание инфракрасных лучей, селективность, химико-биологические реакции).

При отсутствии этих данных должны быть произведены экспериментальные исследования и испытания опытной установки.

2. Производится тепловой расчет установки.

3. Определяются количество излучателей и их расстановка.

4. Выполняются расчет и проектирование тепловой камеры, коммуникационных трубопроводов, вентиляции, автоматики безопасности и регулирования, системы зажигания, выбор контрольно-измерительных приборов. В отдельных случаях проектируется система пожаротушения.

Теплопроизводительность установки может определяться по формуле

$$Q_{уст} = \frac{Q_n + Q_{д.г} + Q_1 + Q_2 + Q_3}{\eta_r} \text{ ккал/ч,}$$

где Q_n — полезно использованное тепло, поглощаемое облучаемым материалом, в ккал/ч;

$Q_{д.г}, Q_1, Q_2, Q_3$ — потери тепла стенами, излучением, транспортом и т. д. в ккал/ч;

η_r — к. п. д. камеры.

Таким образом, если количество тепловой энергии, поглощаемой облучаемым материалом, Q , а теплоизлучение нагретой поверхности Q_n , то для предотвращения перегрева материала получим равенство:

$$Q_n = Q'.$$

Но

$$Q_{\text{п}} = \alpha F_{\text{м}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}) \text{ ккал/ч,}$$

где $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$;

$\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием;

$F_{\text{м}}$ — поверхность материала в м^2 ;

$t_{\text{пов}}$ — температура поверхности материала в $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{в}}$ — температура окружающего воздуха в $^{\circ}\text{C}$.

Количество тепловой энергии, поглощаемой материалом $Q_{\text{п}}$ при облучении газовыми горелками инфракрасного излучения, определяется

$$Q_{\text{п}} = 4,22 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \varphi \beta F_{\text{л}} \text{ ккал/ч,}$$

где $\left(\frac{T}{100}\right)^4$ — температурный фактор, значение которого определяется в зависимости от температуры излучения t $^{\circ}\text{C}$ ($T = 273 + t$);

φ — коэффициент отдачи теплоизлучением;

β — коэффициент поглощения облучаемой поверхности;

$F_{\text{л}}$ — поверхность теплоизлучения в м^2 .

Из первого равенства определяется

$$4,22 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \varphi \beta F_{\text{л}} \approx \alpha F_{\text{м}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{в}}).$$

Отсюда допускаемое значение температурного фактора $\left(\frac{T}{100}\right)^4$, определяющего температуру поверхности теплоизлучения, должно составлять:

$$\left(\frac{T}{100}\right)^4 = \frac{\alpha F_{\text{м}} (t_{\text{пов}} - t_{\text{в}})}{4,22 \varphi \beta F_{\text{л}}}.$$

Таким образом, температура поверхности лучеиспускания может быть тем выше, чем меньше коэффициенты теплоизлучения φ теплопоглощения β и поверхность теплоизлучения $F_{\text{л}}$. Коэффициенты φ и β называются также угловыми коэффициентами и определяются в зависимости от расположения теплоизлучателей и тепловоспринимающей поверхностей. Итак, при газовом обогреве процесс можно регулировать изменением температуры лучеиспускающей поверхности (черные излучатели), расстояния от излучателя до нагреваемого объекта и выключением отдельных горелок (панелей), из которых составлена поверхность излучения.

Возможность регулирования теплового процесса имеет важное значение, когда необходима переменная интенсивность облучения.

Потери тепла $Q_{\text{д.г}}$, Q_1 , Q_2 , Q_3 и к. п. д. $\eta_{\text{т}}$ зависят от способа нагрева материала, конструктивного выполнения и от основных технических параметров установки. Это относится прежде всего к скорости сушки или нагрева (время сушки и нагрева). Скорость процесса должна быть наибольшей, так как она оказывает влияние на потерю тепла, а тем самым и на общую эффективность работы установки.

Например, при слишком долгом нагреве, обусловленном неудачной конструкцией сушильного туннеля (значительная толщина слоя, слишком большие куски, материал сложной формы с тепловыми тенями, неудачное размещение материала в сушильном туннеле, не позволяющее получить хорошее облучение, относительное движение кусков, неорганизованное перекачивание и т. д.), повышается температура отходящих газов, понижается к. п. д. топки $\eta_{\text{т}}$ и увеличиваются потери тепла (Q_1 и Q_2).

Продукты горения (дымовые газы) уносят значительное количество тепла из рабочего пространства камеры. Поэтому необходимо использовать их теплосодержание.

Если известны количество и состав продуктов горения, а также их температура при выходе из рабочего пространства печи, то потери тепла могут быть вычислены по следующей формуле:

$$Q_{\text{дым.газ}} = t (V_1 C_1 + V_2 C_2 + \dots + V_n C_n) L_{\text{г}} Q_{\text{г}} \text{ ккал/ч,}$$

где t — температура отходящих газов в $^{\circ}\text{C}$;

V_1, V_2 — количества соответствующих продуктов горения, полученных при сжигании единицы топлива, в м^3 ;

C_1, C_2 — средние их теплоемкости в ккал/м^3 ;

$L_{\text{г}}$ — количество продуктов горения на единицу топлива в $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$Q_{\text{г}}$ — расход топлива в $\text{м}^3/\text{ч}$.

Потери тепла через стены рабочего пространства камеры зависят от температуры внутри камеры, толщины и коэффициента теплопроводности стен. Хорошей изоляцией стен камеры эта потеря может быть значительно уменьшена. Потери тепла через стены камеры определяют по формуле

$$Q_1 = K (t_1 - t_2) F \text{ ккал/ч,}$$

где K — коэффициент теплопередачи в $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

t_1, t_2 — температуры внутренней и внешней стенок в $^{\circ}\text{C}$;

F — средняя площадь стен камеры в м^2 .

Потеря тепла вследствие излучения при открытых дверцах и через щели камер вычисляется по формуле

$$Q_2 = 4,9 \Phi F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ ккал/ч,}$$

где Φ — коэффициент диафрагмирования, определяемый в зависимости от толщины стен, значение которого, по данным Келлера, приведено в табл. 21;
— площадь отверстия в м^2 ;
 T_1 и T_2 — абсолютные температуры камеры и наружной среды.

Таблица 21

Значения коэффициента Φ		Высота окна в мм				
Толщина стенки камеры в мм	Ширина окна в мм	150	250	450	600	750
		115	150	0,56	0,63	0,66
	300	0,63	0,7	0,73	0,76	0,78
	600	0,68	0,76	0,8	0,82	0,84
	900	0,71	0,79	0,83	0,85	0,87
	1200	0,72	0,81	0,85	0,87	0,89
	1500	0,73	0,82	0,86	0,89	0,91
230	150	0,43	0,49	0,52	0,55	0,56
	300	0,49	0,56	0,6	0,63	0,64
	600	0,55	0,63	0,67	0,7	0,72
	900	0,57	0,66	0,7	0,73	0,75
	1200	0,59	0,68	0,72	0,76	0,78
	1500	0,61	0,69	0,74	0,77	0,79
345	150	0,36	0,42	0,45	0,47	0,49
	300	0,42	0,48	0,52	0,55	0,57
	600	0,47	0,55	0,59	0,62	0,64
	900	0,5	0,58	0,63	0,66	0,69
	1200	0,52	0,6	0,65	0,68	0,71
	1500	0,53	0,61	0,66	0,7	0,72
460	150	0,31	0,36	0,39	0,42	0,43
	300	0,36	0,43	0,46	0,49	0,51
	600	0,42	0,49	0,53	0,56	0,58
	900	0,45	0,52	0,57	0,6	0,62
	1200	0,47	0,55	0,59	0,63	0,65
	1500	0,48	0,56	0,61	0,64	0,67

Потерю тепла в камерах через отверстие, закрытое металлическими дверцами, рассчитывают по приведенной ранее формуле, но вместо коэффициента Φ используют коэффициент $\frac{\Phi}{1+\Phi}$. Если имеются двойные дверцы, этот коэффициент уменьшается вдвое.

Потери на аккумуляцию тепла стенкой имеют большое значение для периодически действующих камер.

Если период работы камер равен τ , то

$$Q_3 = \frac{V\gamma(C_2 t_2 - C_1 t_1)}{\tau} \text{ ккал/ч,}$$

где V — объем кладки в м^3 ;
 γ — объемный вес в кг/м^3 ;
 C_1, C_2 — теплоемкости в $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;
 t_1, t_2 — температура стенки до и после нагрева в $^\circ\text{C}$.

Полученные результаты уточняют согласно ориентировочным величинам оптимальной тепловой нагрузки, которые относят к единице поверхности (обычно к поверхности транспортного устройства). Эти величины зависят от результативной температуры в туннеле над нагреваемым слоем, от температуры нагреваемого материала и от количества используемого тепла. Величины тепловой нагрузки подразделены на пять групп (табл. 22).

Таблица 22

Величины тепловой нагрузки	
Удельная тепловая нагрузка в $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$	Результативная температура сушильного пространства в $^\circ\text{C}$
7000—11 000	150
8000—13 000	200
10 000—16 000	250
12 000—19 000	300
14 000—22 000	350

Диапазон удельного расхода тепла зависит от конструкции туннеля, его температуры, температуры нагрева материала и степени отбора полезного тепла.

На третьей стадии расчета подбирают из конкретных условий тип излучателей и определяют количество их по формуле

$$N = \frac{Q_{\text{уст}}}{Q_{\text{п.г}}},$$

где $Q_{\text{п.г}}$ — тепловая нагрузка горелки в ккал/ч , пересчитанная на результативную температуру в тепловой установке по формуле

$$Q_{\text{п.г}} = \frac{Q_{\text{г}}}{K},$$

где $Q_{\text{г}}$ — номинальная тепловая нагрузка одной горелки в ккал/ч ;

K — коэффициент пересчета:

$$K = 1,2 \text{ при } t = 50 \div 100^\circ\text{C};$$

$$K = 1,35 \text{ » } t = 100 \div 150^\circ\text{C};$$

$K=1,5$ при $t=150 \div 200^\circ \text{C}$;
 $K=1,6$ » $t=200 \div 250^\circ \text{C}$;
 $K=1,7$ » $t=250 \div 300^\circ \text{C}$.

Далее необходимо распределить инфракрасные излучатели по камере.

Очень важно добиться равномерного распределения температур с учетом конфигурации деталей, особенно в поперечном сечении камеры. В продольном сечении (по оси камеры) излучатели размещаются в соответствии с температурной или тепловой

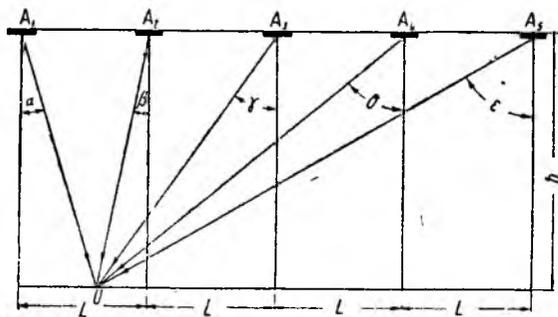


Рис. 84. Равномерность облучения при установке газовых горелок инфракрасного излучения
 $A_1 - A_5$ — излучатели

кривой. Распределение температур влияет на общую тепловую нагрузку излучателей и на производительность установки.

Предположим, что в поперечном сечении туннеля (рис. 84) размещено 5 горелок инфракрасного излучения, которые для простоты будем считать пятью источниками теплового излучателя малой поверхности A_1, A_2, \dots, A_5 . Необходимо, чтобы в любом месте ленты транспортера сохранялась температура, соответствующая количеству поглощенного в том же месте тепла. Сумму излучения в любом месте транспортера находим по формуле

$$I_0 = I (\cos^3 \alpha + \cos^3 \beta + \cos^3 \gamma + \cos^3 \delta + \cos^3 \epsilon),$$

где I_0 — излучение в любом месте (0) на ленте транспортера;
 I — излучение в перпендикулярном направлении.

Количество энергии, излученное за 1 сек единицей поверхности плоского излучения (1 см^2) в пространство полусферы над излучателем, называется суммарным излучением (лучистый поток, эмиссия, E). Количество лучистой энергии, излученное за 1 сек единицей поверхности в перпендикулярном направлении, называется излучением I . По закону Ламберта излучение в направлении под углом α к нормали равно $I_1 = I \cos^3 \alpha$, при этом интенсивность его понижается как функция квадрата расстояния.

Если графически изобразить отношение I_0 в различных местах поперечного сечения туннеля, то получится кривая температурной неравномерности. На рис. 85 приведены кривые температурной неравномерности для различных соотношений расстояния между излучателями и высотой их установки.

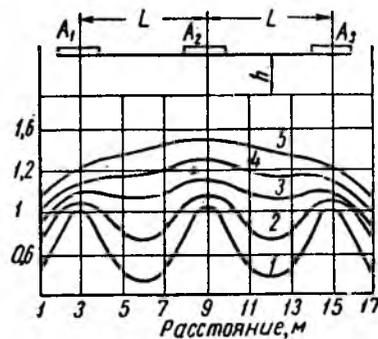


Рис. 85. Кривые температурных неравномерностей для различных соотношений расстояния между излучателями и высотой их установки (кривые относятся к различным значениям h/L)

1 — при $h=0,33L$; 2 — при $h=0,5L$;
 3 — при $h=0,66L$; 4 — при $h=0,83L$;
 5 — при $h=L$

Из диаграммы видно, что при больших расстояниях между излучателями L и при малой высоте h над облучаемым объектом неравномерность распределения температур между соседними излучателями относительно велика (кривая 1). Однако разница

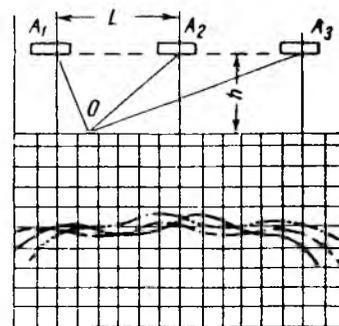


Рис. 86. Огибающие кривые температурных неравномерностей

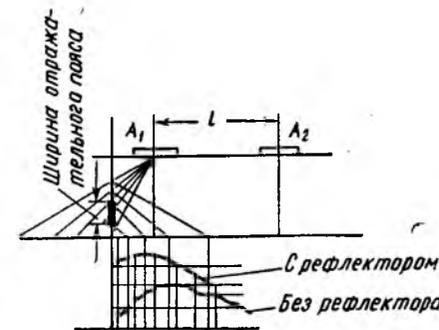


Рис. 87. Уменьшение температурных неравномерностей при помощи отражательных поверхностей

температур по краям и в середине туннеля (камеры) меньше, чем в том случае, когда при том же расстоянии между излучателями последние размещены высоко над лентой транспортера (кривая 5). На практике выбирают обычно средние соотношения расстояний (кривая 2 и 3). Но необходимо учесть, что в действительности неравномерность температуры будет несколько меньшей, ибо при расчете пренебрегали влиянием большой поверх-

ности самих излучателей, считая, что излучение сосредоточено только в их центре. Окончательная неравномерность будет выражаться линией, огибающей соответствующие кривые для центров и краев излучателей, как это показано на рис. 86. Неравномерность температур можно также уменьшить по краям сечения туннеля, размещая отражательные пояса на его боковых стенах (рис. 87). Для более точного расчета распределения температур необходимо учитывать влияние излучателей, установленных в плоскости данного поперечного сечения и соседних излучателей, размещенных по оси туннеля. Дополнительное действие соседнего излучателя в

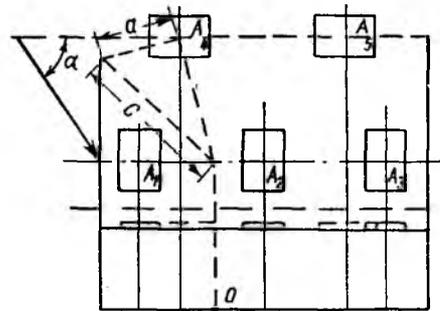


Рис. 88. Дополнительное тепловое действие соседних излучателей (лучистое поле)

точке 0 (рис. 88) определяется по формуле

$$I_0 = I \cos^3 \alpha = I \frac{a^3}{c^3}.$$

Размещение излучателей по продольной оси туннеля производится в соответствии с приведенными ниже рекомендациями. Берется туннель, в котором тепловую нагрузку Q необходимо распределить по оси туннеля в соответствии с температурной кривой A (рис. 89).

Корректируя эту кривую кривой B , выражающей потерю тепла ограждающими стенками туннеля, и кривой D уноса тепла транспортером, получим результирующую температурную кривую E . Площадь под кривой E разделяется на десять частей, соответствующих длине туннеля. Тепловая нагрузка распределяется на излучатели в соответствии с величиной площадей отдельных поясов. Очень важно правильно рас-

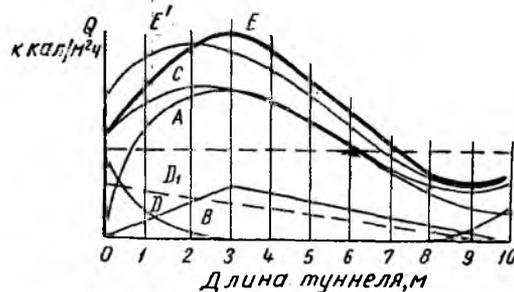


Рис. 89. Температурная кривая излучающего туннеля

A — полезное тепло; B — потери тепла стенками туннеля; C — сумма полезного и потерянного тепла; D — потеря тепла транспортером и листовым металлом; D' — вероятное изменение потерь; E — результирующая температурная кривая

пределив тепловую нагрузку между нижней и верхней частями туннеля, потому что температурная кривая является результирующей как для нижних, так и для верхних рядов горелок. Этим заканчивается в общем виде тепловой расчет установки и размещение излучателей. После этого можно приступить к конструктивной разработке тепловой камеры и всего ее оснащения (четвертая стадия).

Конструктивно тепловая установка обычно состоит из отдельных частей с двойными металлическими стенками, теплоизолированными шлако- или стекловатой. Инфракрасные излучатели, вмонтируемые в потолок туннеля, устанавливаются так, чтобы они не подвергались нагреву теплом отходящих продуктов сгорания. Тепловая изоляция должна отстоять примерно на 1—2 см от вертикальных стенок корпуса излучателя.

При проектировании многих видов лучистой сушки или нагрева до расчетной температуры внутри туннеля 350°C в качестве типовой камеры (туннеля) может служить камера с газовыми горелками инфракрасного излучения, показанная на рис. 90.

Стены туннеля изготавливаются из стальных листов так, что получают два туннеля — внешний и внутренний. По внутреннему туннелю движется сплошная лента транспортера или лента из сетки. Нижняя часть транспортера проходит под полом внутреннего туннеля. Лента транспортера движется со скоростью, зависящей от длины туннеля и количества материала для сушки. В некоторых случаях при сушке сельскохозяйственных продуктов необходимо, чтобы в начале туннеля была более низкая температура, чем в последующей части, где материал высушивается до требуемого содержания влаги. Тепловая нагрузка горелок должна соответствовать этим требованиям. В пространстве между туннелями размещены горелки инфракрасного излучения с пористой керамикой и трубки рекуператора. Нижние горелки, которые также могут быть с пористой керамикой, передают тепло полу туннеля, который нагревается до температуры 200 — 350°C и становится источником теплового излучения. Если же транспортер сетчатый и пол внутреннего туннеля отсутствует, то эти горелки облучают непосредственно материал или изделия снизу и, кроме того, нагревают их также поднимающимися отходящими продуктами сгорания.

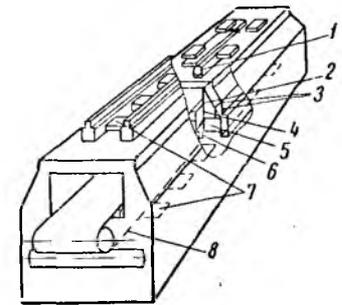


Рис. 90. Схема туннеля с газовыми горелками инфракрасного излучения

1 — рекуператор; 2 — направляющие транспортера; 3 — канал для отходящих продуктов сгорания; 4 — отопительная стена; 5 — воздушный канал; 6 — пол внутреннего туннеля; 7 — излучатели с пористым насадком; 8 — транспортер

Вверху камеры (туннеля) в пространстве между туннелями находятся трубки рекуператора, в которых предварительно нагревается воздух, подаваемый во внутренний туннель. Этот воздух проходит через слой материала, насыщается влагой и уносит испарения через отверстия в верхнюю часть туннеля. Вверху туннеля находятся горелки с пористой керамикой, которые размещаются в шахматном порядке по длине туннеля и работают как потолочные излучатели.

Горелки подвешены так, что их лучистая энергия направлена либо на потолок внутреннего туннеля, который становится черным излучателем, либо непосредственно на материал, подвергающийся тепловой обработке. В этом случае отодвигаются соответствующие заслонки на внутреннем туннеле.

Такое устройство позволяет наряду с производственными тепловыми процессами производить экспериментальные исследования по определению оптимальных режимов тепловой обработки различных материалов в различных спектрах излучения. Отходящие продукты сгорания после смешения с испарениями из сушильного пространства проходят по каналу в дымоотводящую трубу. Материал для сушки подается в туннель из бункера, расположенного перед туннелем; толщину материала можно регулировать до требуемой величины. В торцах туннеля размещены смесители для инфракрасных излучателей. Весь туннель теплоизолирован.

ГЛАВА IV

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ

При сушке материалов с помощью тепловой обработки удаление содержащейся в них влаги происходит путем испарения.

Для испарения влаги материалу должно быть сообщено определенное количество тепла. Переход тепла от теплоносителя может происходить тремя способами.

1. Теплопроводностью (кондукцией), когда теплота переходит внутри материала от одной молекулы к другой, соседней молекуле. Этот процесс наблюдается в твердых, жидких и газообразных телах.

2. Конвекцией, при которой тепло переносится от одной точки к другой вместе с массами вещества (микроскопическое движение) агента сушки. Конвекция имеет место лишь в жидкостях и газах.

3. Лучеиспусканием, т. е. переносом энергии с помощью электромагнитных волн. Этот процесс сопровождается превращением тепловой энергии в лучистую и обратно — лучистой энергии в тепловую.

В процессе сушки наблюдаются все указанные виды теплообмена. Однако в каждом случае, в зависимости от принятого метода сушки и конструкции сушилки, преобладает лишь один из указанных видов теплообмена наряду с участием в процессе двух других способов передачи тепла.

При исследовании и проектировании сушильных устройств следует строго ограничивать все три способа, так как в каждом отдельном случае процесс теплообмена протекает по особым законам. Необходимо учесть, что при сушке наблюдается массообмен, сопровождающийся переходом испаренной из сушимого материала жидкости в окружающую среду.

Процесс теплообмена, сопровождающийся массообменом, более интенсивен, чем при отсутствии массообмена.

Проникновение инфракрасных лучей внутрь влажных материалов обуславливает некоторые особенности внутреннего тепло- и массообмена. Внутри материалов проникает небольшая часть падающего излучения. Однако нагрев материала происходит довольно интенсивно.

Характер температурного поля материала, подвергаемого сушке с помощью излучения, отличается от температурного поля при конвективной сушке. Если в начальный период радиационной сушки окружающая среда имеет температуру ниже температуры поверхности сушимого материала, то за счет отдачи тепла в окружающую среду температура поверхности материала будет ниже температуры глубже расположенных слоев. В верхних слоях облучаемого материала в общем случае происходит значительное повышение температуры — это вызывает интенсивное их обезвоживание.

Быстрому обезвоживанию поверхностных слоев капиллярно-пористых тел способствует циркуляция влажного газа в макрокапиллярах поверхностного слоя, вызываемая явлениями теплового скольжения.

Явление теплового скольжения обусловлено изменением температуры по глубине материала и находится в прямой зависимости от градиента температуры.

В первоначальный период сушки одновременно с уменьшением влагосодержания в верхних слоях материала происходит увеличение влагосодержания и в нижних слоях. Это явление обусловлено противоположностью направлений перемещения тем-

пературного градиента Δt к градиенту влагосодержания Δu и превышением первого над вторым.

При сушке коллоидных тел инфракрасными лучами имеют место еще большие перепады влагосодержания внутри тела. Поверхностные слои быстро высыхают, в то время как внутренние имеют почти первоначальное влагосодержание. Быстрому высыханию поверхностных слоев способствует эффузия влажного газа в микрокапиллярах поверхностного слоя. В силу этого непрерывная сушка коллоидных материалов инфракрасными лучами по сравнению с капиллярно-пористыми протекает гораздо медленнее, с большими градиентами влагосодержания, что вызывает растрескивание и коробление материала. Кроме того, быстрое повышение температуры материала после критической точки приводит к перегреву его и порче.

Поэтому сушку таких материалов следует вести прерывистым (импульсным) облучением, т. е. в сочетании нагрева материала инфракрасными лучами с охлаждением воздухом.

В период отлежки материала температура на его поверхности резко падает и температурный градиент меняет свое направление (температура, как и влагосодержание, внутри материала больше, чем на его поверхности). В этом случае температурный градиент не замедляет, а ускоряет подвод влаги к поверхности материала и влагосодержание внутри его в период отлежки значительно уменьшается. Для повышения интенсивности сушки коллоидных материалов инфракрасными лучами рекомендуется также там, где это возможно, вести сушку в сравнительно тонком слое.

Вследствие перемещения влаги внутрь материала при облучении его инфракрасными лучами обеспечивается сохранение водорастворимых веществ, представляющих ценность для качества материала, например для пищевого продукта.

Импульсное облучение может быть достигнуто двумя способами: 1) периодическим выключением излучателей; и 2) применением отражающих экранов (заслонок) периодически экранирующих излучатели. При инерционных излучателях (с массивными насадками, панелями) более рациональным является второй способ.

Процессы сушки, связанные с удалением влаги из различных материалов при достаточной их толщине с помощью инфракрасного излучения, в основном протекают по схеме распределения лучистого потока (см. рис. 81, а). Процессы сушки лакокрасочных покрытий протекают по схеме (см. рис. 82). Исследования Л. Л. Павловского показали, что пропускающая способность лакокрасочных покрытий повышается с увеличением длины волны излучения.

Увеличенная скорость сушки лакокрасочных покрытий при инфракрасном облучении объясняется прежде всего совпадением направления температурного градиента с градиентом влагосодержания.

К тому же благодаря высокой пропускающей способности тонких пленок этих покрытий на поверхности их при лучистой (радиационной) сушке не образуется корки, препятствующей удалению растворителя, как это имеет место при конвективной сушке.

При сушке инфракрасными лучами интенсивность испарения влаги и растворителей может увеличиваться по сравнению с конвективной сушкой в десятки раз, соответственно сокращая период сушки.

Преимуществом терморрадиационной сушки лакокрасочных покрытий и различных материалов являются: компактность установки, позволяющая сократить производственные площади, значительная интенсивность сушки, а следовательно, низкая себестоимость ее и увеличенная производительность труда.

Имеются данные о высокой эффективности сушки с помощью инфракрасных лучей лакокрасочных покрытий металла, тканей (окрашенных, пропитанных, гуммированных), бумаги и других материалов. Применение указанных лучей дало возможность значительно повысить скорость сушки.

Терморрадиационные сушилки с трубчатыми и особенно с панельными излучателями по сравнению с ламповыми обеспечивают более равномерный обогрев и сушку изделий и в большинстве случаев более экономичны. При газовом обогреве излучателей они, как и терморрадиационные с электрообогревом, отличаются простотой управления. Любое изменение температуры может быть достигнуто за несколько минут без остановки сушилки.

На рис. 91 показаны комплексные тепловые балансы сушильных агрегатов: лампового и с металлическими излучателями. Металлический излучатель обогревается газовым топливом. Сравнение тепловых балансов показывает явные преимущества сушилки с металлическим излучателем. Сравнение тепловой экономичности по тепловому балансу не является полным, так как не-

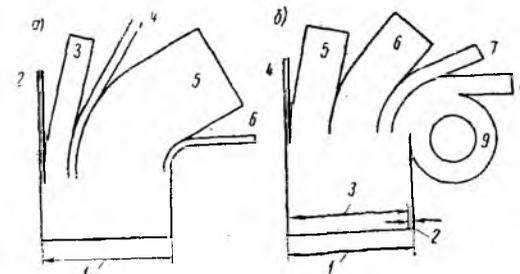


Рис. 91. Диаграмма комплексных тепловых балансов радиационных сушилок. Обозначения даны в %

а — для ламповой сушилки: 1 — тепло, подведенное к лампам (100); 2 — тепло на испарение спирта (0,21); 3 — тепло на нагрев изделий (16,7); 4 — потери тепла в окружающую среду (5,28); 5 — потери тепла с отсасываемым воздухом (72,81); 6 — рассеивание света (5); б — для сушилки с металлическими излучателями, обогреваемыми газом: 1 — подведенное тепло (100); 2 — физическое тепло воздуха (1,05); 3 — тепло газового топлива (98,95); 4 — тепло на испарение спирта (0,1); 5 — тепло на нагрев изделий (30,6); 6 — потери с отсасываемым воздухом (34,6); 7 — потери тепла в окружающую среду (9,6); 8 — потери тепла с отходящими газами (12,4); 9 — тепло воздухоподогревателя (12,5)

обходимо еще учесть, что лучистая энергия в ламповой сушилке получена за счет электроэнергии, которая вырабатывается с суммарным к. п. д., равным 25%. Это показывает рациональность широкого промышленного применения терморadiационных сушильных установок с обогревом горячими газами.

Для рационального использования инфракрасных излучателей их устанавливают в специальных сушилках, которые в зави-

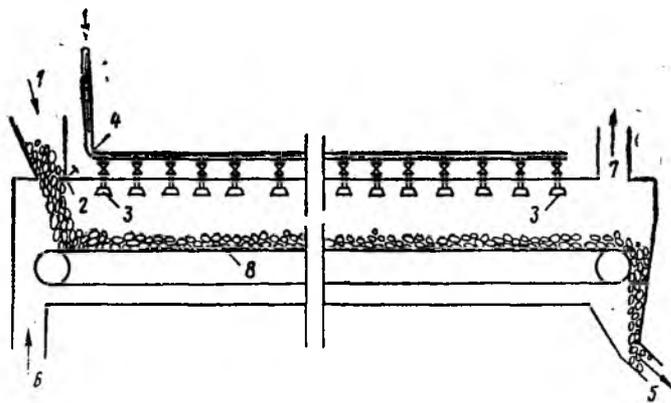


Рис. 92. Принципиальная схема туннельной сушилки

1 — бункер для влажного материала; 2 — шибер; 3 — газовые горелки инфракрасного излучения; 4 — подвод газа; 5 — выход сухого материала; 6 и 7 — подвод и выход продуктов сгорания и испарения; 8 — транспортная лента

симости от местных условий могут быть стационарными или передвижными. Конструктивно сушилки выполняются в виде камер, туннелей, барабанов, колпаков и т. п. На рис. 92 приведена принципиальная схема туннельной сушилки, предназначенной для сушки сыпучих материалов в тонком слое.

Сушилка оборудована плоским ленточным транспортером. Для удаления продуктов сгорания, водяных паров и пропускаемого через сушилку воздуха служит вытяжная труба. Нагрев материалов осуществляется горелками инфракрасного излучения, располагаемыми в одну или несколько линий в шахматном порядке. Расстояния между горелками и высота их размещения над лентой зависят от вида высушиваемого материала, его влажности и допустимой температуры нагрева.

Использование одной и той же сушилки для разных материалов достигается изменением числа включаемых горелок, температуры поверхности излучателя (тепловой нагрузки горелок) и скорости движения ленты. В некоторых случаях эти сушилки оборудуются подвижными горелками или транспортными лентами, позволяющими изменять расстояния между горелками и транспортером. Иногда на транспортере устанавливаются под-

ставки под облучаемые изделия, позволяющие располагать эти изделия на определенном расстоянии от горелок.

На рис. 93 показана схема небольшой комбинированной передвижной туннельной сушилки, предназначенной для сушки сыпучих сельскохозяйственных продуктов в полевых условиях. Сушилка состоит из теплоизолированного туннеля, стенки которого изготовлены из листовой стали. Внутри туннеля расположена перфорированная или сетчатая транспортная лента с такими размерами отверстий или ячеек, чтобы высушенный материал через них не проваливался. Лента движется с помощью привод-

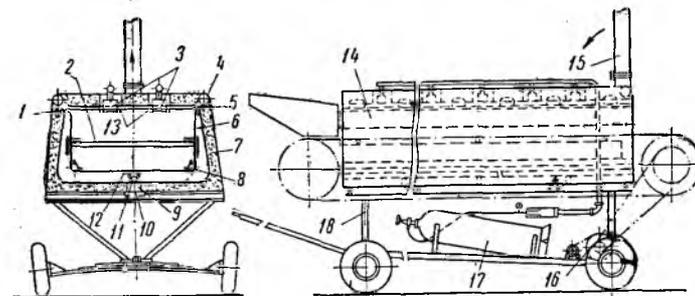


Рис. 93. Схема передвижной туннельной сушилки

1 и 4 — сборные коллекторы; 2 — транспортная лента; 3 — горелки инфракрасного излучения; 5 — каналы для отвода паров и газов в сборный коллектор; 6 — стальная стенка туннеля; 7 — теплоизоляция; 8 — рекуперативные трубы; 9 — канал для подвода вторичного воздуха; 10 — раздвижные шторки для регулирования количества вторичного воздуха; 11 — многопламенная горелка; 12 — подгорелочный лист; 13 — раздвижные шторки; 14 — туннель; 15 — откидная дымоотводящая труба; 16 — приводной механизм транспортера; 17 — баллон со сжиженным газом; 18 — тележка для передвижения сушилки

ного механизма с регулируемой скоростью вращения. Для нагрева продуктов в верхней части сушилки установлены горелки с пористой керамикой, а в нижней части под дном туннеля — пламенные многофакельные горелки трубчатой формы. Пламенные горелки служат для нагрева продуктами сгорания днища туннеля и его боковых стенок. Излучающие горелки могут нагревать либо верхнюю стенку туннеля, либо непосредственно продукты, находящиеся на ленте. Для этого под излучающими горелками расположены раздвижные шторки, при открытии которых происходит непосредственное облучение продуктов, при закрытии — облучение этих шторок как части верхней стенки туннеля. В первом случае сушка осуществляется лучами с максимальной интенсивностью излучения соответствующей длинам волн 2,4—2,7 мк, а во втором — излучением (с максимумом λ 4—5 мк) от стенки туннеля, нагретой до 300—400°С.

Для повышения к. п. д. и некоторого ускорения процесса сушки сушилка оборудована рекуперативными трубами, в которых

прогревается наружный воздух, проходящий далее через просушиваемый слой материала. Продукты сгорания и испаренная влага удаляются в атмосферу через специальные каналы и откидную трубу. По экспериментальным данным, оптимальные показатели работы этого аппарата при сушке табака и хмеля следующие: температура продуктов 52—53°С, толщина слоя 4—4,5 см, время высыхания до кондиционной влажности около 2 ч.

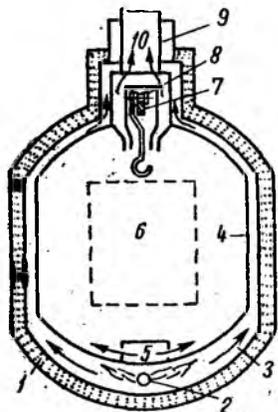


Рис. 94. Схема сушилки с нагреваемыми излучающими стенками

1 — корпус с теплоизоляцией; 2 — газовая пламенная горелка; 3 — топка; 4 — излучающая стенка; 5 — воздух для вентиляции; 6 — высушиваемое изделие; 7 — опорный рельс; 8 — роликовая цепь; 9 — отвод продуктов сгорания; 10 — отвод растворителя и вентиляционного воздуха

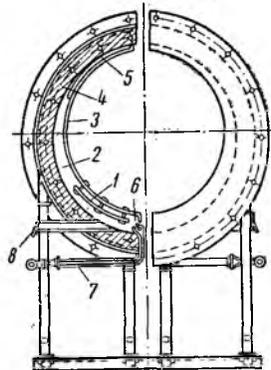


Рис. 95. Схема туннельной сушилки, состоящей из отдельных секций

1 — жарозащитный лист; 2 — газоход; 3 — излучающая поверхность; 4 — теплоизоляция; 5 — ребра для увеличения поверхности теплообмена; 6 — газовая пламенная горелка; 7 — подвод газа; 8 — отверстие для зажигания в процессе горения

камере распределен так, чтобы в начале процесса сушки изделие омывалось воздухом с более низкой температурой, а в конце процесса — с более высокой температурой. Последнее достигнуто за счет того, что холодный воздух входит в каналы и выходит из них в сушильную камеру в ее начальном участке, не успевая сильно нагреться. Этому способствуют и щели переменного сечения по длине камеры, которые выпускают в начале ее большее количество воздуха с меньшей температурой.

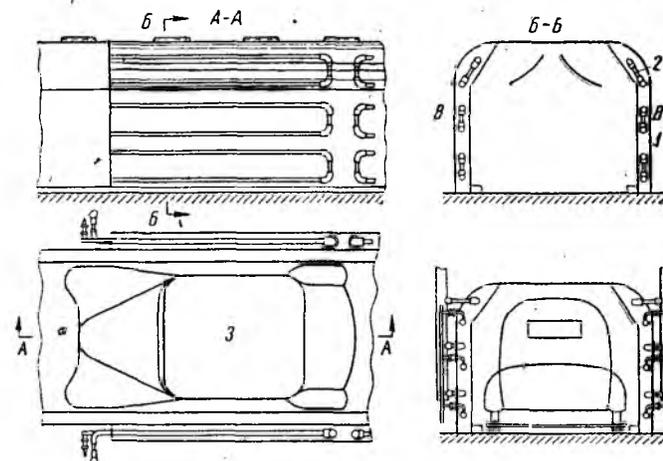


Рис. 96. Схема сушилки с излучающими трубами

1 — корпус сушилки; 2 — излучающие трубы; 3 — изделие

Смесь воздуха с влагой или парами растворителя и продукты сгорания газа удаляются из сушилки по отдельным каналам. Канал, по которому удаляется воздух, размещен внутри канала, по которому движутся продукты сгорания газа. Такая конструкция предотвращает конденсацию паров воды или растворителя даже в тех случаях, когда упругость их ничтожна. Аналогичные сушилки могут монтироваться из отдельных секций.

Секции представляют панели в виде полуцилиндров или параллелепипедов, обогреваемых пламенными горелками.

Схема туннельной сушилки, собранной из секций в виде полуцилиндров, приведена на рис. 95. Эта сушилка имеет низкий к.п.д. (30—40%), недостаточно гигиенична в эксплуатации и требует усиленной вентиляции помещения, где она установлена.

В некоторых случаях в качестве излучателей для инфракрасной сушки применяют трубы, нагреваемые пламенем и продуктами сгорания газа. Схема такой сушилки, предназначенной для сушки покрытий автомобилей, изображена на рис. 96.

Недостатком рассмотренных агрегатов для сушки лаков и эмалей является, как было указано выше, относительно низкий

Если при сушке материалов и изделий удаляются не водяные пары, а растворители, смеси которых с воздухом взрывоопасны (бензол, ксилол, ацетон, уайт-спирит и др.), то применяют сушилки, в которых раскаленные продукты сгорания газа герметично отделены от атмосферы в сушильной камере. Для предотвращения образования взрывоопасной смеси в камеры подается такое количество воздуха или его смеси с продуктами завершения сгорания, при котором объемное содержание растворителя доводится до 1% и ниже.

На рис. 94 приведена схема сушилки, в которой стенки нагреваются продуктами сгорания газа. Температура излучающих стенок составляет 300—400°С, что соответствует максимуму интенсивности излучения при длинах волн 4—5 мк. Для повышения равномерности нагрева всей излучающей поверхности газоходы топки постепенно суживаются снизу вверх. Воздух в сушильной

к. п. д., а достоинством — высокая скорость сушки и отличное качество высушенного покрытия. По опытным данным время сушки большинства распространенных лаков и эмалей составляет 10—15 мин.

В ряде случаев для радиационной сушки используют не специальные сушилки, а непосредственно излучающие горелки. Примером такой сушки, получившей распространение в практике, является сушка штукатурки в ремонтируемых или небольших вновь построенных зданиях, защитных покрытий при их ремонте, мелких литейных стержней и др.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ СУШКИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ.

Первые промышленные установки для сушки лакокрасочных покрытий с помощью лучистой энергии были сооружены на автомобильных заводах, и с тех пор в автомобильной промышленности инфракрасной сушке принадлежит основное место. Повысилось качество окраски кузовов автомобилей и резко сократилось время сушки, что особенно важно в поточном производстве. Здесь процессы окраски и сушки изделий должны протекать непрерывно.

Современные инфракрасные сушильные установки на автомобильных и других заводах представляют собой туннели, на внутренних поверхностях которых установлены светлые или темные излучатели. Сушка окрашенного автомобиля в таком туннеле длится всего примерно 10—15 мин. Камера оборудована приточно-вытяжной вентиляцией. Кузова автомобилей омываются потоком нагретого воздуха. Такое сочетание конвективного и инфракрасного методов сушки значительно экономит тепловую энергию.

Сушка эмали инфракрасными лучами происходит в камере при более низкой температуре внутреннего воздуха в ней, чем при конвективной сушке. Это позволяет избежать порчи приборов, которые могут быть смонтированы до момента сушки покрытия. Вместе с тем температура подложки достигает требуемых значений. Метод инфракрасного нагрева незаменим для сушки последнего наружного слоя лака на собранных автомобилях. Инфракрасные лучи так быстро просушивают отделочный слой, что не успевают повредить нетеплостойкие детали.

Форма сечения рабочего пространства сушильной установки может быть приспособлена к форме поверхности автомобиля, и потому сушка происходит равномерно по всей ее площади. Кроме того, в этих сушилках можно ремонтировать покрытия на автомобильных кузовах, используя такие же эмали, какие применялись при первой окраске их, и производить сушку, не удаляя стекол, подушек и приборов. Для этих целей может быть использована и передвижная сушильная установка, имеющая фор-

му дугообразного свода и оборудованная генераторами инфракрасных лучей, медленно перемещающаяся на резиновых шинах над автомобилем, высушивая лак на только что отремонтированных местах. Светлые излучатели в этом случае незаменимы, благодаря безынерционному включению и выключению.

При сушке искусственных смоляных лаков взрывоопасность не так велика; для полного затвердевания пленки лака необходимо, однако, нагревать ее до температуры 120—150° С. Использование инфракрасного излучения позволяет легко решить эту задачу. При этом удается достигнуть резкого сокращения времени сушки, что является важнейшим фактором в современном поточном производстве. Сушка инфракрасными лучами мало применима для лаков, содержащих большое количество масла, так как одновременно с сушкой обычно протекает процесс окисления, который не может быть ускорен за счет нагрева.

Сушка нитролаков происходит в естественных условиях, так как растворитель испаряется уже при комнатной температуре.

Сушка же синтетических и пентафталевых эмалей осуществляется при температуре 120—150° С.

От правильно выбранного режима сушки зависят механические и защитные свойства покрытий: твердость, стойкость к удару, адгезия, эластичность, водостойкость и др.

До последнего времени широко использовались электрические инфракрасные сушильные установки. За последние годы начали применяться газовые инфракрасные сушильные установки. Вследствие того что газ является наиболее дешевым топливом, терморadiационные сушильные установки с газовым обогревом являются более рентабельными.

Тепловая энергия, затрачиваемая на высушивание единицы изделия в этих установках, обходится в среднем в 2—4 раза дешевле, чем в сушилках с электроподогревом. Газовые инфракрасные установки для сушки лакокрасочных покрытий в основном применяются двух типов: с темными и светлыми излучателями.

В установках с темными излучателями металлические панели нагреваются проходящими через них продуктами сгорания. При этом максимальная температура излучателя составляет 460° С.

В установках со светлыми излучателями эксплуатируются беспламенные горелки инфракрасного излучения, которые обладают большей интенсивностью (плотностью) потока излучения.

На рис. 97, 98, 99, 100, 101 приведены графики, характеризующие зависимость проницаемости лакокрасочных пленок от температуры излучающего экрана и соответствующей ей длины волны максимума излучения.

Из графиков видно, что все лакокрасочные покрытия обладают довольно высокой проницаемостью (70% и выше) в диапазоне волн излучения длиной от 3,3 до 5 мк.

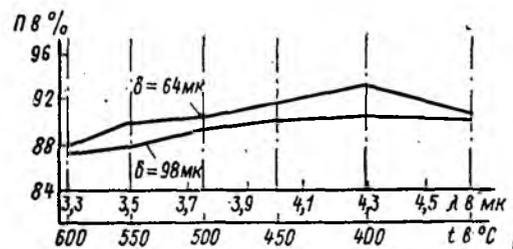


Рис. 97. Проницаемость сырой пленки мочевино-формальдегидного лака УВЛ-1 (толщина указана для высушенной пленки)

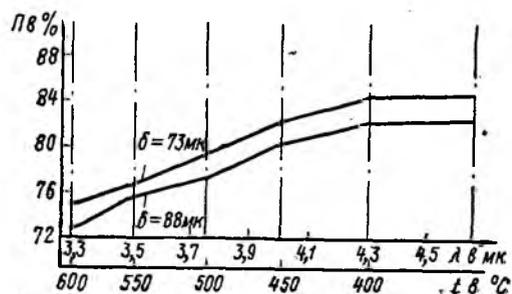


Рис. 98. Проницаемость сырой пленки мочевино-формальдегидной эмали У-311 (белая)

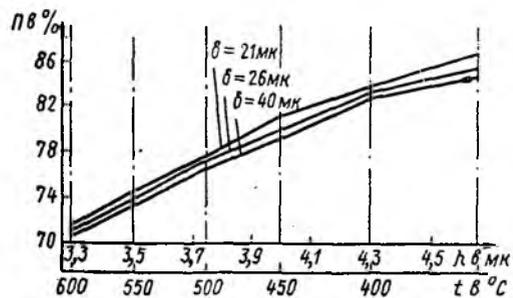


Рис. 99. Проницаемость сухой пленки пентафталевой эмали ПФ-71 (бежевая)

Температура пленки в процессе сушки при прочих равных условиях определяется оптическими (коэффициент поглощения), тепловыми (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) и физическими (вес, масса) свойствами окрашенного изделия. Исследования показали, что сушку лакокрасочных по-

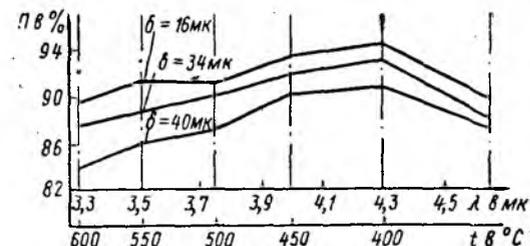


Рис. 100. Проницаемость сырой пленки мочевино-формальдегидной эмали У-417 (черная)

крытий можно осуществлять с температурой излучающего насадка 800—900°С. Насадок излучает инфракрасные лучи в диапазоне 1,1—3 мк.

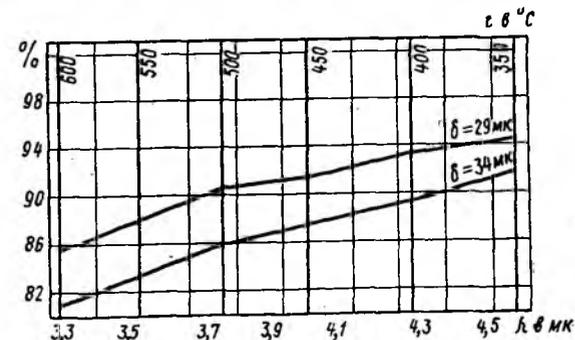


Рис. 101. Проницаемость сырой пленки метаминоалкидной эмали № 843 (бежевая, второе покрытие)

На рис. 102 приведена номограмма для определения оптимальных параметров сушки некоторых лакокрасочных покрытий, нанесенных на стальной лист толщиной 0,8—1,2 мм при применении газовых горелок типа КГ-3 и ГИИВ-1. По номограмме можно определить: зависимость температуры поверхности нагрева от разных расстояний до горелочных насадков; расстояние между осями горелок КГ-3 (12-плиточные) и ГИИВ-1 (10-плиточные); расстояние горелок от нагреваемой поверхности и время сушки покрытия.

Рассмотрим примеры практического применения инфракрасных газовых излучателей для сушки лакокрасочных покрытий.

На рис. 103 представлена сушильная камера с горелками инфракрасного излучения, смонтированная на Московском троллейбусном ремонтном заводе. Проект газоборудования выполнен институтом Мосгазпроект по результатам лабораторных ис-

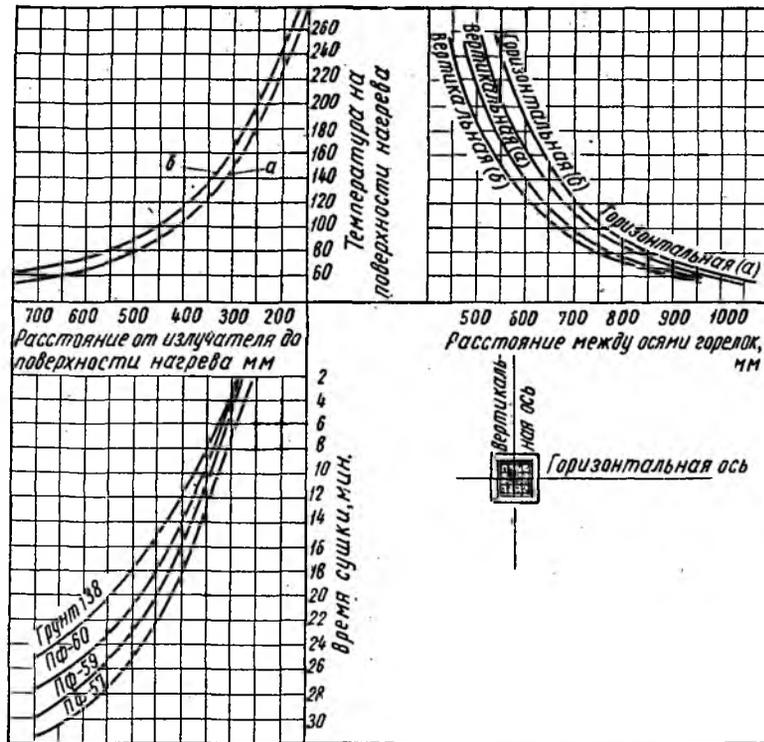


Рис. 102. Номограмма для определения оптимальных параметров сушки лакокрасочных покрытий при применении газовых горелок инфракрасного излучения

а — 10-плиточная горелка типа ГИИВ-1, площадь излучателя $0,029 \text{ м}^2$; б — 12-плиточная горелка типа КГ-3, площадь излучателя $0,035 \text{ м}^2$

пытаний, проведенных в Академии коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова. При определении расположения горелок применена номограмма (см. рис. 102). Сушильная установка представляет собой закрытую камеру, в которой по стенам, потолку и на воротах располагаются горелки инфракрасного излучения. Камера проходная, имеет закрывающиеся ворота. Для направления и ориентации окрашенных поверхностей троллейбуса от-

носительно горелок в полу имеется колея, по которой перемещаются колеса троллейбуса.

Всего в камере установлено 138 горелок инфракрасного излучения ГИИВ-1, объединенных в группы (всего 13 групп). Крайние группы к воротам имеют по 14 горелок (по 4 горелки расположены на воротах для облучения торцевых частей троллейбуса), остальные группы имеют по 10 горелок. Камера управляется от автоматического пункта управления — щита управле-

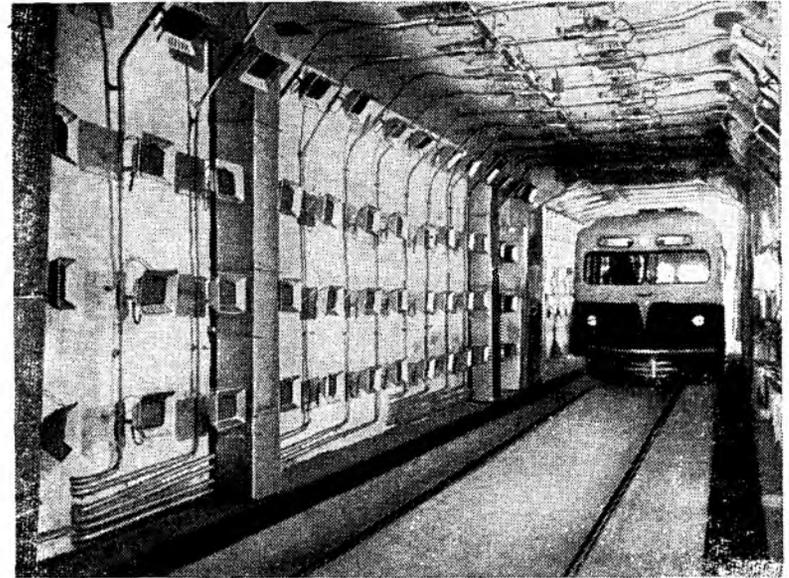


Рис. 103. Сушильная камера с горелками инфракрасного излучения для сушки троллейбусов

ния, который расположен на расстоянии 5 м от камеры. Расстояние между осями горелок по вертикали 750 мм, по горизонтали 850 мм. Расстояние от насадка горелок до поверхности кузова троллейбуса 500 мм.

Для поддержания стабильного давления перед горелками газоснабжение камеры осуществлено от обособленного узла редуцирования.

Для окраски троллейбусов применяются пентафталевые эмали марок, приведенных в номограмме (см. рис. 102).

В качестве растворителей в указанных эмалях применяются огнеопасные и взрывоопасные жидкости (уайт-спирит, скипидар, ксилол). По нормам безопасности необходимо, чтобы процентное содержание паров растворителя в камере было в 5 раз меньше, чем нижний предел взрываемости их. Установлено, что тридцати-

кратный обмен воздуха полностью обеспечивает взрывобезопасность камеры.

Для поддержания требуемого теплового режима в камере воздухообмен принят 100 кратным, что еще более делает безопасным эксплуатацию камеры.

Схема приточно-вытяжной вентиляции сушильной камеры показана на рис. 104. Вентиляционная установка смонтирована на крыше камеры. Температура поступающего воздуха в камеру составляет 15—20° С. Система вентиляции имеет смесительную камеру, где холодный воздух, поступающий с улицы, смешива-

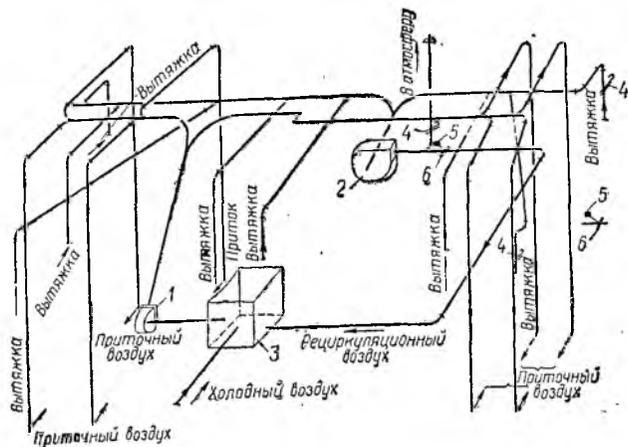


Рис. 104. Схема приточно-вытяжной вентиляции сушильной камеры

1 — приточный вентилятор; 2 — вытяжной вентилятор; 3 — смесительная камера; 4 — шибер; 5 — место установки исполнительного механизма ИМ-2/120 м; 6 — заслонка ЗД

ется с рециркуляционным. Нагнетание воздуха из смесительной в сушильную камеру осуществляется приточным вентилятором через металлические воздуховоды, заканчивающиеся в подпольных каналах с жалюзийными решетками. Удаление отработанного воздуха (содержащего продукты сгорания от горелок и пары растворителя) осуществляется через решетки в потолке камеры и систему металлических коробов.

Сушильная установка оборудована автоматикой безопасности и регулирования. Автоматика безопасности предусматривает: отключение подачи газа при падении давления газа ниже допустимой величины и выключении приточно-вытяжной вентиляции; последовательность розжига горелок и невозможность пуска газа в горелки без предварительного включения приточно-вытяжной вентиляции и электрического зажигания.

В качестве исполнительного прибора автоматики безопасности применен предохранительно-запорный клапан с электромагнитной головкой. Минимальное давление газа контролируется предохранительно-запорным клапаном. Работа приточной вентиляции контролируется реле потока воздуха РПВ, чувствительный элемент которого установлен в трубопроводе за приточным вентилятором. Вытяжная вентиляция контролируется сигнализатором падения давления СПДК.

При нарушении нормальной работы приточно-вытяжной вентиляции электрическая цепь электромагнитной головки, установленной на предохранительно-запорном клапане, размыкается и последний перекрывает подачу газа к горелкам камеры.

Зажигание горелок осуществляется от электрических спиралей.

Автоматическое регулирование температуры воздуха, поступающего в камеру, осуществляется дроссельной заслонкой с электрическим исполнительным механизмом ИМ-2/120, связанным с электроконтактным термометром, датчик которого установлен в трубопроводе приточного воздуха, и работающим в комплекте со ступенчатым преобразователем.

Эксплуатация радиационной установки с горелками инфракрасного излучения для сушки троллейбусов после окраски дает значительный экономический эффект по сравнению с ранее применявшейся конвективной сушкой.

При радиационной сушке горелками инфракрасного излучения каждый слой покрытия сушится 15 мин вместо 4 ч, а все семь слоев покрытия за 1 ч 45 мин вместо 28 ч. Температура на поверхности кузова 80° С.

Внедрение радиационной сушки на заводе дает экономию газа в год 1 233 225 м³, а электроэнергии — 207 060 квт·ч.

Результаты технико-экономического расчета приведены в табл. 23.

Таблица 23

Технико-экономические показатели от внедрения радиационной сушки троллейбуса в руб.

Наименование	До внедрения	После внедрения
Годовой объем производства	580	580
Затраты на сушку одного кузова троллейбуса (газ, электроэнергия)	26,22	2,39
Удельные капитальные затраты	32,08	47
Экономический эффект	—	12522,2

На заводе одной иностранной фирмы (США) установлена газовая сушильная печь непрерывного действия. Установка используется для сушки защитного лакового покрытия механиче-

ских затяжек «молния». Сушильная печь двухъярусная; на каждом уровне установлено 12 горелок инфракрасного излучения, снабженных объемными керамическими сетками с теплопроизводительностью по 3000 ккал/ч. При сжигании смеси природного газа и воздуха керамика нагревается до температуры 870—900° С. На расстоянии 75 мм от излучающей поверхности температура изделий составляет 55—60° С. Время сушки на двух ярусах 1 мин; производительность 550 кг/ч; размеры 1,2×0,6×0,6 м. Применение газовой сушильной печи позволило сократить время сушки, улучшить качество покрытия и сократить затраты на топливо в 4 раза.

Сушильная печь оборудована приборами автоматики безопасности и регулирования.

Сушка лакокрасочных материалов источниками темного излучения. На рис. 105 показана радиационная сушильная камера с излучающими панелями, обогреваемыми газовыми горелками.

Излучающие панели (стальные, чугунные) позволяют изменять величину теплового потока от 2000 до 22 000 ккал/м²·ч за счет расхода газа. Сжигание газа производится в самих панелях с использованием инжекционных горелок или в выносных топках.

Конструкция термоизлучателей, работающих на газообразном топливе, представляет собой герметическую сварную коробку из жаростойкой стали толщиной 4 мм, поверхность которой (панель) вогнута для лучшей передачи тепла лучеиспусканием. Сечение коробки по ходу продуктов сгорания постепенно сужается, что улучшает условия теплопередачи.

На внутренней стороне излучающей стенки (панели) приварены ребра, способствующие выравниванию температуры по высоте панели. Нижняя часть панели (до ребер) экранируется дополнительными металлическими листами, чтобы предохранить стенку панели от действия высокой температуры продуктов сгорания. Наружная поверхность коробки теплоизолирована двухслойной изоляцией: высокотемпературной толщиной 30 мм, состоящей из смеси золонита (6 весовых частей), глиноземистого цемента (1 весовая часть) и низкотемпературной, состоящей из минеральной ваты толщиной 110 мм.

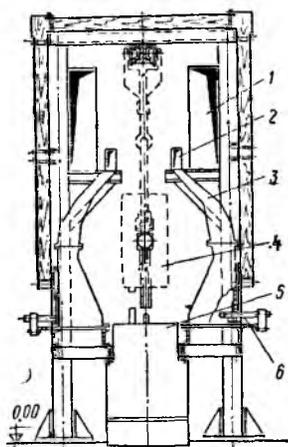


Рис. 105. Радиационная газовая сушильная камера с темными излучателями

1 — короб для отсоса продуктов испарения; 2 — короб для отвода продуктов сгорания; 3 — излучающая панель; 4 — окрашенная деталь, подвешенная к конвейеру; 5 — рециркуляционный короб; 6 — газовая горелка

В нижнюю часть коробки вмонтированы газовые инжекционные горелки.

Внутренняя излучающая поверхность камеры, образованная вогнутыми панелями, напоминает цилиндр, что обеспечивает сушку объемных деталей со сложной конфигурацией.

Изделия транспортируются через камеру подвесным конвейером. В верхней части камеры (по всей ее длине) образована щель для прохода подвесок с изделиями; в нижней части установлены панели и нагнетательный воздуховод.

Удаление продуктов сгорания газа из коробок (панелей) происходит через патрубки в верхней части, соединенные с общим газоотводным коробом.

В зависимости от требований, предъявляемых к сушке лакокрасочных покрытий, и от характера самого покрытия применяют два способа использования отходящих продуктов горения газов: а) конвективный обогрев изделий непосредственно отходящими газами и б) конвективный обогрев изделий воздухом, нагретым отходящими газами до необходимой температуры.

В первом случае отходящие газы с температурой около 500° С смешиваются с воздухом, поступающим для снижения их температуры до 100—150° С. Затем они отсасываются вентилятором и подаются в короб, расположенный в нижней части сушильной камеры.

Во втором случае отходящие газы отсасываются из сборного газохода и поступают в рекуператор, где температура их снижается до 100—200° С.

Отдельный вентилятор засасывает воздух из цеха, направляет его в рекуператор, где он нагревается до необходимой температуры и нагнетается в короб в нижней части сушильной камеры.

По торцам камеры предусмотрены зонтовые вытяжки, через которые отсасывают использованный горячий воздух, насыщенный парами растворителя. Вытяжку снабжают дефлектором или специальным вентилятором. Рекуператор, вентиляторы с приводами, воздуховоды и газоходы смонтированы на площадке опорной конструкции.

В сушильной камере предусмотрено автоматическое регулирование температуры панелей в пределах 350—460° С путем изменения подачи газа к горелкам.

На рис. 106 показан общий вид терморadiационной камеры с сжиганием газа в панелях (коробках) для сушки покрытий на мелких изделиях.

Камера предназначена для сушки лакокрасочных покрытий, нанесенных на детали, размеры которых в поперечном сечении по движению конвейера не превышают 600 мм.

Для облучения изделий применяют экраны темного излучения (панели), нагреваемые газом. Предусмотрена рекуперация тепла отходящих газов для нагрева воздуха в трубчатом рекуператоре. Воздух подается в нижнюю зону камеры, чтобы обес-

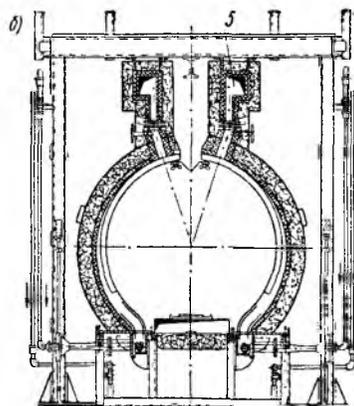
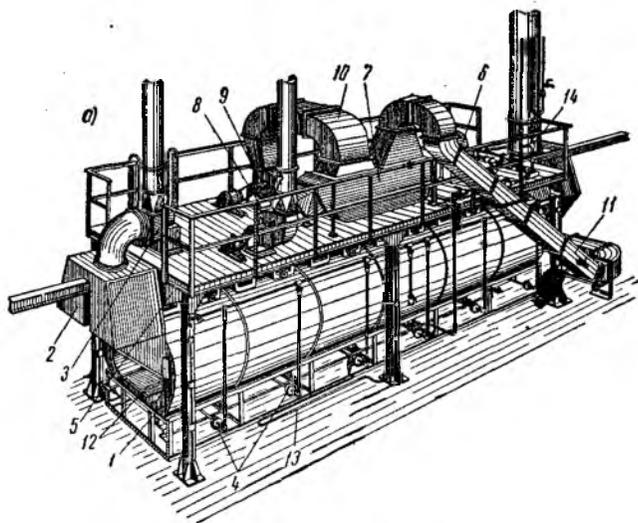


Рис. 106. Общий вид терморрадиационной камеры с сжиганием газа в панелях для сушки покрытий на мелких изделиях

а — общий вид; б — поперечный разрез

1 — излучающая панель; 2 — вытяжной зонт; 3 — вытяжной вентилятор; 4 — газовые горелки; 5 — сборный коллектор продуктов сгорания; 6 — короб подвода продуктов сгорания к рекуператору; 7 — рекуператор трубчатый; 8 — вентилятор для отсоса и выброса продуктов сгорания после рекуператора; 9 — вентилятор для подачи воздуха через рекуператор в камеру; 10 — воздухопровод к рекуператору; 11 — воздухопровод от рекуператора к камере; 12 — распределитель горячего воздуха в камере; 13 — запальная горелка; 14 — дроссель-клапан

печь более равномерный обогрев необлучаемой части поверхности узлов и деталей.

Корпус камеры сборный, состоит из шести секций, каждая из которых в свою очередь составляется из двух нагревательных панелей.

Нагревательная панель представляет собой пустотелую сварную конструкцию из жаростойкой листовой стали. Перепад температур между нижней и верхней частями панели на ее излучающей поверхности не превышает 40°C .

Горелки инжекционные. Трубчатый перфорированный насадок горелки располагается внутри панели, в нижней ее части, а смеситель — за ее пределами.

Для подсоса вторичного воздуха в нижней части панели имеется дверца, при помощи которой можно регулировать подачу воздуха.

Верхняя часть панели заканчивается фланцевыми патрубками для отвода продуктов сгорания газа в сборный отсасывающий газоход с последующим направлением их в рекуператор.

Тыльная поверхность панели и наружная сборных газоходов защищены двойным слоем термоизоляции.

В камере предусмотрено регулирование температуры панелей. Система регулирования включает: автоматически регулирующей самопишущий электронный потенциометр типа ПСР1-06; ступенчатый импульсный прерыватель СИП-01 и исполнительный механизм ИМ-2/120, перекрывающий заслонку на основном газоходе.

Датчиками температуры являются термпары, установленные в панелях.

Контроль за работой горелок осуществляется световой и звуковой сигнализацией.

Температуру воздуха, выходящего из камеры в атмосферу, и воздуха, поступающего в камеру, измеряют термпарой с милливольтметром типа МПЩПр-54.

Газ на запальных горелках поджигают автоматически с помощью спиралей сопротивления.

Такие же панельные терморрадиационные сушильные камеры разработаны для сушки различных объемных изделий (баллонов, холодильников, стиральных машин и т. д.).

На рис. 107 показана принципиальная схема компактной высокопроизводительной терморрадиационной сушильной камеры, установленной на Московском автозаводе им. Лихачева и предназначенной для сушки рам грузовых автомашин в вертикальном положении. При температуре панелей 450°C температурная неравномерность по высоте камеры не превышает нескольких градусов. Продолжительность сушки составляет 8 мин вместо 40 мин или 1 ч при конвективной сушке. Камера позволяет осуществлять высокий подогрев воздуха, так как через

подогреватель проходит рециркулирующий поток смеси горючих газов с воздухом, который повышает тепловую экономичность сушильной камеры.

На опыте работы данной камеры можно рекомендовать для выравнивания температуры поверхности излучающей панели применять рециркуляцию отходящих продуктов сгорания. Для этой цели может быть применена горелка специальной конструкции, изображенная на рис. 108.

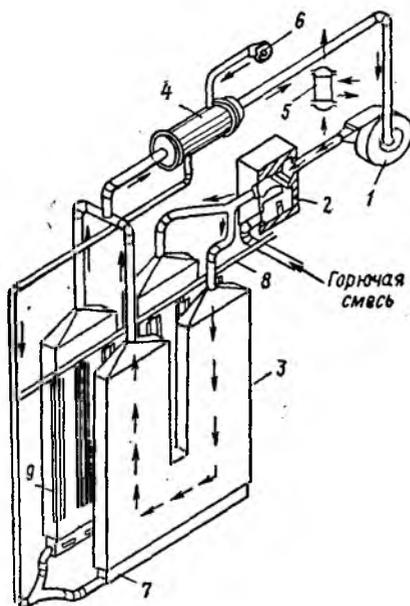


Рис. 107. Схема терморрадиационной сушильной камеры с рециркуляцией дымовых газов внутри излучающих панелей

1 — рециркуляционный вентилятор; 2 — топка; 3 — излучающие панели; 4 — рекуператор для подачи горячего воздуха в камеру; 5 — рекуператор для воздушных завес; 6 — вентилятор для горячего дутья; 7 — короб горячего дутья; 8 — цепь конвейера; 9 — сушильные изделия

Природный газ через газовое сопло поступает в инжекционный смеситель. Газовоздушная смесь сгорает в шамотной туннели, вокруг которой имеется кольцевая щель. Через эту щель отработанные продукты горения подаются в камеру смешения, где горячие продукты горения разбавляются воздухом или отработанными газами из излучающих панелей до требуемой температуры. Замер температуры производится в вытяжных патрубках панелей; температура составляет примерно 470°C . Кожух горелки и камера смешения должны быть изготовлены из жароупорной стали и изолированы слоем шлаковаты.

Терморрадиационные сушильные камеры с сжиганием газа в выносных топках или в панелях нашли широкое применение в Советском Союзе. В целях применения в промышленности суши лакокрасочных покрытий источниками

темного излучения были произведены исследования физико-механических свойств лакокрасочных покрытий, высушенных этим методом.

Исследованию подверглись следующие лакокрасочные материалы: а) грунты: № 138, свинцовосуриковый № 186, У-223; б) эмали: ПФ-64, ПФ-65, ПФ-57, У-311 и ФСХ-26; в) шпаклевки: ЛШ-1 и наполнитель на тяжелом шпате; г) лак 4С.

Окраска производилась на металлических и деревянных образцах.

Физико-механические свойства определялись по следующим показателям: внешний вид; адгезия; твердость по маятнику; гибкость по шкале НИИЛКа; стойкость на удар; способность к шлифовке.

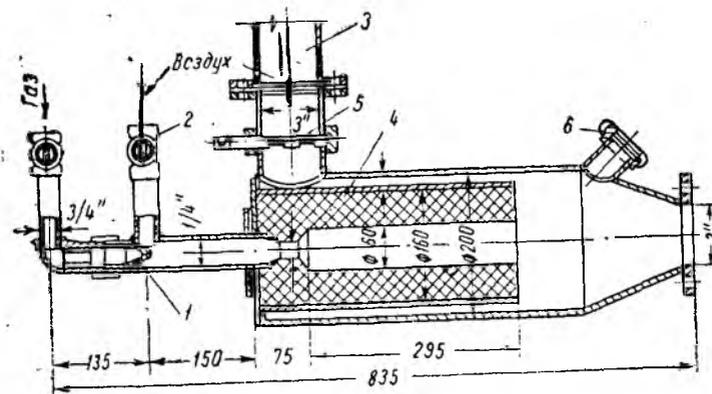


Рис. 108. Газовая горелка специальной конструкции для нагрева излучающих панелей продуктами горения газа, разбавленными воздухом

1 — газовое сопло; 2 — воздух для горения; 3 — воздух для разбавления; 4 — керамический туннель; 5 — дроссельная заслонка; 6 — отверстие для зажигания и наблюдения за горением

Таблица 24

Результаты сравнительных испытаний суши покрытий панелью темного излучения

Лакокрасочный материал	Вязкость по ВЗ-4 в сек	Толщина пленки в мк	Режим сушки			Твердость по маятнику	Эластичность по шкале НИИЛКа в мм	Прочность на удар в кгс/см ²	Внешний вид
			расстояние от излучателя до образца в мм	температура образца в $^{\circ}\text{C}$	время высыхания в мин				
Грунт-138	25	25	110	110	3	0,57	2	50	Хорошо шлифуется
То же	25	25	200	70	6	0,6	1	50	
Грунт У-223	28	35	150	85	3	0,44	3	50	
Лаковая шпаклевка ЛШ-1	28	210	150	85	15	—	—	—	
Эмаль ПФ-65	50	25	100	110	3	0,3	1	50	
То же	50	25	200	70	6	0,36	1	50	
Эмаль ПФ-64	50	22	100	110	5	0,4	1	50	
То же	50	22	200	70	10	0,27	1	50	
Эмаль ПФ-57	45	25	100	110	6	0,26	1	50	
То же	45	25	200	70	12	0,3	1	50	
Свинцово-сурьмовый грунт	40	30	150	85	20	—	—	—	
Эмаль У-311	30	30	150	85	3	0,45	3	50	
» У-417	30	30	150	85	5	0,45	3	50	

Таблица 25

Результаты сравнительных испытаний сушки лакокрасочных покрытий панелью темного излучения на деревянных образцах

Лакокрасочные материалы	Порода древесины и ее влажность в %	Расстояние образца от излучателя в мм	Время сушки слоя в мин	Качество высушенного лакокрасочного покрытия (определения визуальные)
Грунт № 186	Сосна 7	200	6	Хорошее
Эмаль ФСХ-26	» 7	200	15 (первый)	»
		200	15 (второй)	»
Грунт № 138	» 7	200	10—15	»
		150		
Лаковая шпаклевка ЛШ-1	» 7	200	10 (первый)	»
		200	10 (второй)	»
Лак 4С	» 7	200	10 (первый)	»
		200	10 (второй)	»
Грунт У-223	Пресскартон	200	10	»
Эмаль У-311	»	200	7	»
Лак 4С	Бук 10	200	10 (первый)	»
		200	8 (второй)	»
Лак 4С, порозаполнитель (три слоя)	Дуб 11	200	10 (первый)	Мелкие пузыри
		300	15 (второй)	Хорошее
		300	15 (третий)	»
Порозаполнитель	Бук 18	200	10	»
		200	8	»
Лак 4С	» 18	200	10	Мелкие пузыри
				То же
Грунт 138	Сосна 14	200	10	»
Эмаль ПФ-65	» 14	200	10	Отдельные пузыри
Грунт 186	Бук 17	200	4	Хорошее
Грунт 186, эмаль ФСК-26	Сосна 14	250	7	»
		250	10	»
Лак 4С	Бук 14	300	10 (первый)	»
		300	15 »	»
Лак 4С	» 15	250	16 »	»
			10 (второй)	»
			10 (третий)	»
Лак 4С	» 24	250	10	Пузыри
Грунт 486	Сосна 30	200	8	»

Испытание было проведено на деревянных и металлических (стальные пластины) образцах.

Данные замеров и сравнительных испытаний покрытий на стальных образцах приведены в табл. 24.

Из приведенной таблицы видно, что качество полученных пленок соответствует техническим требованиям.

Мочевино-формальдегидные и пентафталевые эмали, а также грунты № 138 и У-223 при терморadiационной сушке высыхают в несколько раз быстрее, чем при конвективной сушке.

Эмали и грунты, а также шпаклевка лаковая ЛШ-1 с толщиной слоя не больше 200—250 мк, высушенные панелью темного излучения, имеют удовлетворительные показатели твердости, сопротивления удару и адгезии.

Цвет светлых тонов эмалей У-311, ПФ-57 и грунта У-223, высушенных терморadiацией, не изменяется, в то время как при конвективной сушке эти краски желтеют.

Сушка лакокрасочных покрытий на деревянных образцах (сосна, бук и дуб) размером 120×90×20 мм производилась при влажности древесины от 7 до 30%.

Покрытие образцов из пресскартона производилось грунтом № У-223 и эмалью № У-311, а сушка их осуществлялась при температуре излучателя 360°С. На расстоянии 200 мм от излучателя температура на поверхности образцов составила 80—85°С, а на расстоянии 300 мм — 45—50°С. Результаты сушки приведены в табл. 25.

Одновременно были высушены покрытия лаком 4С на деталях внутреннего оборудования вагона (аптечка, рамки).

Продолжительность сушки каждой окрашенной стороны 20—25 мин, расстояние 250 мм. Качество сушки хорошее.

Из проведенной работы можно сделать вывод, что сушку лакокрасочных покрытий по дереву и пресскартону можно производить панелями темного излучения при влажности не выше 13% — для сосны, 11% — для дуба и 15% — для бука.

Расстояние окрашенной поверхности от излучателя должно быть 200—300 мм.

Подготовка поверхности деталей и различных узлов под окраску при терморadiационном методе сушки не отличается от подготовительных операций при других методах сушки лакокрасочных материалов.

Продолжительность высыхания пентафталевой эмали № 65 при различной толщине стальной детали и расстоянии ее от излучателя 100 мм приведена в табл. 26.

Таблица 26

Результаты испытаний сушки покрытий пентафталевой эмалью № 65 при различной толщине стальной детали

Толщина детали в мм	Время высыхания лакокрасочного покрытия в мин	Время охлаждения детали до нормальной температуры в мин	Примечание
2	3	8	Измерение производилось при температуре помещения 22°С
5	4	25	
10	8	40	
20	12	50	
30	17	68	
40	23	80	
50	30	92	

При сушке толстостенных деталей следует учитывать, что деталь охлаждается постепенно и, следовательно, процесс высыхания заканчивается при охлаждении детали до нормальной температуры. Поэтому при сушке лакокрасочных покрытий нагрев толстостенной детали следует довести до требуемой температуры, после чего она может быть вынута из сушильной камеры.

Деталь, обладая большой теплоемкостью, длительное время сохраняет тепло и обеспечивает ускоренный процесс сушки.

Продолжительность высыхания пентафталевой эмали № 65 при различном расстоянии детали от источника излучения приведена в табл. 27.

Таблица 27

Продолжительность высыхания пентафталевой эмали № 65 при различном расстоянии детали от источника темного излучения

Расстояние детали от источника в мм	Время высыхания покрытия в мин
100	3
200	6
300	10
400	18
500	36

Окрашенные детали, подвергающиеся терморadiационной сушке, не должны превышать высоту панели более чем на 50 мм. В этом случае необходимо следить за высотой подвесок конвейерного сушила.

Время движения конвейера при сушке окрашенных деталей различной толщины устанавливаются опытным путем.

Конвейер должен иметь вариатор скорости и камеру принудительного охлаждения окрашенных деталей, чтобы не задерживать последующих операций.

Опыт сушки шпаклевки ЛШ-1 терморadiационным методом показал, что толщина слоя не должна превышать 300 мк. При более толстом слое шпаклевка начинает вспучиваться.

Наибольшая производительность малярных работ достигается при сочетании окраски изделий в электрическом поле и при сушке лакокрасочных покрытий источниками темного излучения.

Процессы окраски в электрическом поле и терморadiационная сушка легко поддаются автоматизации, дают возможность значительно сократить расход окрасочных материалов и энергии, а также уменьшить потребность в производственных площадях.

Преимущества терморadiационной сушки перед конвективной следующие: терморadiационная сушка сокращает продолжительность процесса от 5 до 30 раз; конструкция панелей темного излучения очень проста в изготовлении и не требует

больших капитальных затрат; применение панелей темного излучения не требует создания больших и громоздких сушильных камер, что значительно сокращает использование производственных площадей; панели темного излучения имеют очень малую потерю тепла в окружающую среду и не требуют дополнительного тепла на нагрев стен камеры; удельный расход тепла на 1 м² высушиваемого лакокрасочного покрытия значительно меньше, чем при конвективной сушке, и составляет от 430 до 1300 ккал/ч·м² в зависимости от скорости высыхания лакокрасочного материала.

Методика расчета терморadiационной сушильной установки

Основными параметрами режима терморadiационной сушки покрытий являются температура и продолжительность нагрева. Задаваясь одним из этих параметров, можно найти и другой по

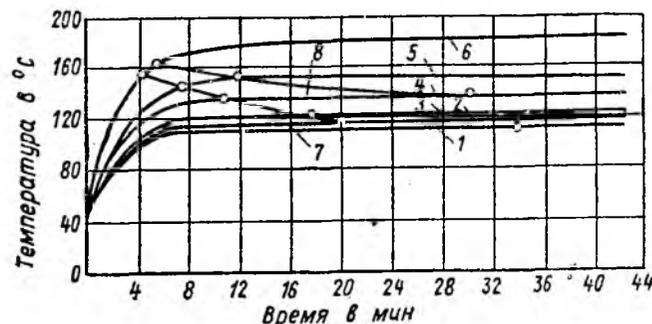


Рис. 109. Кривые для определения оптимальных режимов сушки покрытий меламиноалкидной эмалью МЛ-12-14

1-6 — кривые различных темпов нагрева; 7 — кривая заданной твердости 0,5; 8 — кривые сохранения цветовой отливки

разработанным научно-исследовательским институтом технологии лакокрасочных покрытий (НИИТЛП) графикам для лакокрасочного материала различных марок. Пример такого графика для меламиноалкидной эмали приведен на рис. 109. Для обеспечения необходимого качества лакокрасочного покрытия необходимо, чтобы пленка его за время сушки приобрела заданную твердость без изменения оттенка цвета. В приведенном графике оптимальный режим сушки покрытия находится в пределах между соответствующими кривыми 7 и 8.

Задачей теплового расчета терморadiационных сушильных установок является определение мощности генератора лучистой энергии и его размеров, количества горелок для сушильных камер, размеров и расположения панельных излучателей в сушильной камере. При проектировании радиационных сушильных

установок большое значение имеет определение изменения температуры изделий в процессе их облучения, так как кинетика прогрева определяет время их сушки. Эти расчеты позволяют получить максимальную температуру нагрева изделий, что также имеет очень важное значение. Для теплого расчета терморadiационных сушильных установок (кроме режима сушки) необходимо также знать физические свойства материала изделия.

Расчет терморadiационной сушильной камеры производится на основании следующих исходных данных:

- а) вида высушиваемого лакокрасочного материала и установленного технологического процесса режима его сушки;
- б) толщины пленки высушиваемого материала в мм;
- в) твердости пленки после высушивания по маятникову прибору;
- г) расхода лакокрасочного материала в кг/ч;
- д) количества испаряемого из пленки растворителя в кг/ч;
- е) размера окрашиваемой площади изделий в м²/ч;
- ж) материала изделия и толщины материала в мм;
- з) размера облучаемой площади изделий в м²/ч;
- и) веса изделий, проходящих через сушильную камеру, в кг/ч;
- к) шага навески технологических подвесок в м;
- л) скорости конвейера в м/мин;
- м) веса конвейера с подвесками в кг/м;
- н) габаритных размеров высушиваемых изделий в м;
- о) габаритных размеров сушильной камеры в м;
- п) расстояния от излучателей до поверхности изделий в м;
- р) средней температуры в цехе в °С.

Прежде чем приступить к тепловому расчету, необходимо опытным путем на основании принятого режима сушки получить кривую изменения температуры изделий за время прохождения их в сушильной камере, а затем разбить ее длину на зоны с самостоятельным управлением. Количество зон в камере зависит от ее длины и характера кривой изменения температуры.

Далее задаются средней температурой воздуха по зонам. При этом в первой и в последней зонах температура воздуха должна быть ниже, чем в промежуточных (с учетом подсоса холодного воздуха через торцовые проемы камеры).

Тепловой баланс для любой зоны сушильной установки выражается формулой

$$AE_i S_0 \tau_i = CG (t'_i - t''_i) + \alpha (t_i - t_{bi}) S \tau_i,$$

- где A — коэффициент поглощения инфракрасных лучей лакокрасочным покрытием на изделии;
- E_i — плотность лучистого потока в каждой зоне в ккал/м²·ч;
- S_0 — облучаемая поверхность изделия в м²/ч;

- τ_i — время нахождения изделий в каждой зоне в ч;
- C — удельная теплоемкость материала изделия в ккал/кг·град;
- G — вес высушиваемых изделий в кг/ч;
- t'_i — температура изделия, поступающего в зону, в °С;
- t''_i — температура изделия, выходящего из зоны, в °С;
- t_{bi} — температура воздуха в зоне в °С;
- α — общий коэффициент теплообмена с учетом конвекции и радиации в ккал/м²·ч·град (практически α принимается равным 15—20 ккал/м²·ч·град);
- S — полная поверхность изделия в м²/ч.

В приведенной формуле индекс i обозначает параметры, относящиеся к зонам сушильной установки.

Плотность лучистого потока в каждой зоне определяется из уравнения теплового баланса:

$$E_i = \frac{CG (t'_i - t''_i) + \alpha (t_i - t_{bi}) S \tau_i}{AS_0 \tau_i} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч},$$

где $t'_i - t''_i$ — абсолютная разность температур изделий на входе и выходе каждой зоны.

Для зон сушильной камеры, где температура изделия, поступающего в зону и выходящего из нее одинаковая, плотность лучистого потока составит:

$$E_i = \frac{\alpha (t_i - t_{bi}) S}{AS_0} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}.$$

Количество затрачиваемого тепла в каждой зоне сушильной установки на нагрев изделий равно:

$$Q_{ni} = E_i S_0 K_i \text{ ккал/ч},$$

где K_i — отношение времени нахождения изделия в одной зоне к полному времени сушки изделия.

Полное количество тепла, идущего на нагрев изделий во всех зонах, составляет:

$$Q_n = S_0 \sum_i^n E_i K_i \text{ ккал/ч}.$$

Одновременно подсчитываются тепловые потери в процессе сушки по следующим формулам.

1. Потери тепла через стенки сушильной установки в каждой зоне

$$Q_1 = KF_i (t_{стi} - t_{ц}) \text{ ккал/ч},$$

где K — коэффициент теплоотдачи в ккал/м²·ч·град;

F_i — поверхность стенок, отдающих тепло в каждой зоне, в м²;

$t_{ст1}$ — температура стенок в зоне в °С;

$t_{ц}$ — температура в цехе в °С.

2. Потери тепла на нагрев подвесок и движущейся части конвейера по всей камере

$$Q_2 = CG(t_2 - t_1) \text{ ккал/ч,}$$

где C — теплоемкость металла подвесок и конвейера в ккал/кг·град;

G — вес подвесок и конвейера в кг/ч;

t_1 — начальная температура подвесок и конвейера в °С;

t_2 — конечная температура металла подвесок и конвейера в °С.

3. Потери тепла на нагрев краски и испарение растворителя

$$Q_3 = CG_n(t_2 - t_{с.к}) + G_p r \text{ ккал/ч,}$$

где C — теплоемкость лакокрасочной пленки в ккал/кг·град;

G_n — вес лакокрасочной пленки, приходящейся на часовую производительность сушилки, в кг;

t_2 — конечная температура пленки в °С;

$t_{с.к}$ — температура сырой краски в °С;

G_p — вес растворителя, испаряемого в сушильной камере, в кг/ч;

r — теплота испарения растворителя в ккал/кг.

4. Потери тепла через торцовые проемы сушильной установки

$$Q_4 = 3600 vbh\delta\rho C(t_{в.с} - t_{ц}) \text{ ккал/ч,}$$

где v — средняя скорость воздуха в торцовом проеме в м/сек;

b — ширина проема в м;

h — расстояние между нейтральной плоскостью, в которой скорость воздуха равна нулю, и нижней частью торцового проема в м;

δ — коэффициент заполнения проема изделиями;

ρ — плотность воздуха в кг/м³;

C — теплоемкость воздуха в ккал/кг·град;

$t_{в.с}$, $t_{ц}$ — температура воздуха в сушильной камере и в цехе в °С.

Расстояние между нейтральной плоскостью и нижней частью торцового проема определяется уравнением

$$h = \frac{H \sqrt[3]{\frac{T_{ц}}{T_{с}}}}{1 + \sqrt[3]{\frac{T_{ц}}{T_{с}}}},$$

где H — высота проема в м;

$T_{ц}$, $T_{с}$ — абсолютные температуры воздуха в цехе и сушильной камере в °К.

$$v = 2,2 \sqrt{\frac{h(T_{с} - T_{ц})}{T_{с}}} \text{ м/сек.}$$

Потери тепла через торцовый проем можно также определить и по формуле

$$Q_4 = qC(t_{в} - t_{н}) \text{ ккал/ч,}$$

где q — количество свежего воздуха, поступающего через открытый проем, в кг/сек;

C — теплоемкость воздуха в ккал/кг·град;

$t_{в}$ — температура воздуха внутри сушильной установки в °С;

$t_{н}$ — температура наружного воздуха в °С.

Количество воздуха, поступающего через проем, определяют по формуле

$$q = 1,92 b \sqrt{H^3} \sqrt{\frac{(\rho_n - \rho_{вн}) \rho_n \rho_{вн}}{(\sqrt[3]{\rho_{вн}} + \sqrt[3]{\rho_n})^3}} \text{ кг/сек,}$$

где b — ширина проема в м;

H — высота проема в м;

ρ_n — плотность наружного воздуха в кг/м³;

$\rho_{вн}$ — плотность воздуха внутри камеры в кг/м³.

5. Одновременно следует провести расчет теплотерь с воздухом, необходимым для создания безопасной концентрации паров растворителя в камере.

Эти потери определяются по формуле

$$Q_5 = \frac{G_p}{\rho_p} \rho C(t_{в.с} - t_{ц}) \text{ ккал/ч,}$$

где G_p — количество удаляемого растворителя в кг/ч;

ρ_p — допустимая концентрация паров растворителя в кг/м³.

Из потерь тепла с уходящим воздухом Q_4 и Q_5 следует выбрать наибольшее их значение при расчете сушильной установки.

6. Если сушильная установка оборудована системой рециркуляции с промежуточным подогревом воздуха, к теплотерям следует добавить тепло, идущее на подогрев воздуха в калорифере, т. е.:

$$Q_6 = L_{р.в} \rho C(t_2 - t_1) \text{ ккал/ч,}$$

где $L_{р.в}$ — количество рециркулируемого воздуха в м³/ч;

$(t_2 - t_1)$ — разность температур воздуха на входе и выходе из калорифера в °С.

Сумма всех тепловых потерь подсчитывается по формуле

$$Q' = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6) K \text{ ккал/ч,}$$

где K — поправочный коэффициент, учитывающий потери тепла через неплотности стенок ($K=1,1 \div 1,2$).

Суммарную мощность генераторов инфракрасных лучей получаем по формуле

$$N = \frac{Q_n + Q'}{\eta_r} \varepsilon \text{ ккал/ч,}$$

где ε — коэффициент запаса ($\varepsilon=1,15 \div 1,2$);
 η_r — к.п.д. горелки инфракрасного излучения.

К.п.д. всей сушильной установки находим из формулы

$$\eta = \frac{Q_n}{Q_n + Q'}$$

Продолжительность сушки терморadiационным методом определяем по формуле

$$\tau = 10^a H^b t^c,$$

где τ — продолжительность сушки в мин;
 H — твердость пленки по маятниковому прибору;
 t — температура нагрева пленки в °С;
 a, b, c — постоянные показатели степени, зависящие от типа лакокрасочного материала и толщины пленки.

Значения приведены в табл. 28.

В том случае когда толщина пленки покрытия отличается от приведенной в табл. 28 (но не более 60 мк), продолжительность сушки определяется по формуле

$$\tau \approx 10^a H^b t^c \left(\frac{\delta}{20} \right)^{\varphi},$$

где δ — толщина пленки в мк;
 φ — показатель степени; для синтетических материалов $\varphi \approx 0,5$; для синтетических материалов, содержащих в значительной степени масла, $\varphi \approx 0,7$.

Если нужно произвести сушку лакокрасочного покрытия на изделиях сложной конструкции (без изменения цвета покрытия), устанавливают допускаемую неравномерность нагрева пленки.

Неравномерность нагрева пленки должна быть также учтена, когда в одной и той же сушильной установке при одном и том же режиме осуществляется одновременная сушка различных лакокрасочных покрытий.

Таблица 28

Значения величин a, b, c, m и n для некоторых лакокрасочных материалов при расчете режимов сушки терморadiационным методом

Материал	Толщина пленки в мк	Значения величин, характеризующих твердение покрытия			Значения величин, характеризующих изменение оттенка цвета		
		a	b	c	цвет пленки	m	n
Эмаль МЛ-12	20	11,21	1,53	-4,57	Изумрудный	28,3	-12,5
То же	20	11,21	1,53	-4,57	Бирюзовый	21,47	-9,38
»	20	11,21	1,53	-4,57	Голубой	14,16	-6,07
»	20	11,21	1,53	-4,57	Серый	15,9	-6,08
Эмаль МЛ-111	20	7,17	1,67	-2,68	—	—	—
Эмаль МЛ-25 (твердость 0,75)	30	8,93	—	-3,75	—	—	—
Эмаль ПФ-133	20	6,13	0,72	-2,2	Зеленый	8,1	-3,8
» ПР-133	20	6,13	0,72	-2,2	Красно-коричневый	17,9	-7,82
» ПФ-133	20	6,13	0,72	-2,2	Серый	11,5	-4,8
» № 1425 (твердость 0,2)	20	5,21	—	-1,97	»	11,5	-4,85
Эмаль № 2062 (твердость 0,2)	20	5,13	—	-2,02	»	11,9	-5
Эмаль № 300 (твердость 0,3)	20	6,46	—	-2,53	—	—	—
Эмаль ПФ-115	20	9,58	—	-4,11	Серый	12,5	-5,8
» ПФ-28	20	7,04	—	-2,72	Черный	5,75	-2,5
» ПФ-223 (бывш. А-9Ф)	20	6,75	—	-2,08	—	—	—
Эмаль ПФ-223 (бывш. А-12Ф)	20	7,08	—	-2,77	—	—	—
Эмаль ЭП-74Г (твердость 0,55)	20	6,09	—	-2,34	Серый	9,5	-4
Эмаль ЭП-92	30	13,4	0,9	-6,25	—	—	—
» ЭП-51	20	10,8	1,28	-4,58	Белый	20,23	-8,7
» МЧ-13	20	8,61	0,73	-3,53	Голубой	14	-5,9
» У-311	20	8,61	0,73	-3,53	Белый	—	—
» ПЭ-126	20	6,7	2,8	-2,32	—	—	—
» ПЭ-127	20	2,7	9,06	-11,16	—	—	—
Эмаль КФ-19г (твердость 0,15)	20	6,44	—	-2,82	—	—	—
Эмаль КФ-19М (твердость 0,15)	20	5,55	—	-2,18	Серо-голубой	9,6	-4,1
Эмаль ПФ-223 (твердость 0,2)	20	6,86	—	-2,56	—	—	—
Эмаль ЗИС-13	30	11,27	2,03	-4,2	—	—	—
» ВЛ-515	20	3,84	0,8	-1,3	—	—	—
» К-2 (твердость 0,6)	20	5,44	—	-1,66	—	—	—
Лак ФГ-9	30	4,04	—	-1,27	—	—	—
» № 170 (твердость 0,1)	20	8,04	—	-3,8	—	—	—
Грунт АЛГ-14	20	7,5	1,46	-2,78	—	—	—

Продолжение табл. 28

Материал	Толщина пленки в мк	Значения величин, характеризующих твердение покрытия			Значения величин, характеризующих изменение оттенка цвета		
		a	b	c	цвет пленки	m	n
Грунт 138	20	6,71	0,36	-2,41	—	—	—
» ФЛ-03К	20	8,28	0,67	-3,2	—	—	—
» ЭП-00Т	20	7,62	0,71	-2,85	—	—	—
Серо-дикая масляная краска	30	0,75	1,82	-2,31	—	—	—
Серо-голубая масляная грунтовка	30	9,11	2,24	-2,76	—	—	—

Допустимая неравномерность нагрева покрытия для данной температуры сушки, при которой сохраняется внешний вид пленки, определяется по формуле

$$K = \left(\frac{10^{a-m} H^b}{t^{n-c}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

где K — коэффициент максимально допустимой неравномерности нагрева покрытия.

В случае одновременной сушки различных лакокрасочных покрытий a , b и c принимают по лакокрасочному материалу, имеющему наибольшую продолжительность сушки, а значения величин m и n — по наиболее термочувствительному лакокрасочному материалу.

Чем ближе по значению K к единице, тем более высокую равномерность нагрева необходимо достигнуть для получения качественного покрытия.

Например, если температура сушки покрытия эмалью принята равной 130°C , а максимально допускаемое значение коэффициента неравномерности нагрева соответствует 1,05, то предельная температура нагрева детали равна

$$t_d = 130 \cdot 1,05 = 136,5^\circ\text{C}$$

В качестве примера приводится расчет конвейерной термо-радиационной сушильной камеры для сушки кабин грузового автомобиля.

Для расчета приняты следующие основные данные:

Лакокрасочный материал	МЛ-12-14
Время сушки в мин	12
Твердость пленки по маятниковому прибору	0,5
Окрашиваемая поверхность в $\text{м}^2/\text{ч}$	840
Облучаемая поверхность трех зон в $\text{м}^2/\text{ч}$	420
Вес изделий, проходящих через сушильную камеру, в $\text{кг}/\text{ч}$	6000
Вес одной кабины в кг	200

Шаг по подвескам изделий в м	2,8
Расход лакокрасочного материала в $\text{кг}/\text{ч}$	150
Материал изделия (сталь листовая) толщиной в мм	1,2
Скорость конвейера в $\text{м}/\text{мин}$	1,4
Вес 1 пог. м конвейера в кг	12
Температура в пехе в $^\circ\text{C}$	25
Габаритные размеры сушильной камеры (длина \times ширина \times высота) в м	16,8 \times 3 \times 3,4

Тепловой расчет установки начинается с подбора режима сушки покрытия согласно графику, приведенному на рис. 109. Задаваясь временем сушки 12 мин, по кривым выбирается максимальная температура нагрева изделия 150°C . Для расчета вся сушильная установка разбивается на три равные зоны с таким расчетом, чтобы максимальная интенсивность облучения приходилась на первую зону, что обеспечивает быстрый нагрев изделий до заданной температуры в этой зоне (термоудар).

Расчет камеры производится по зонам на основании данных, приведенных в табл. 29.

Таблица 29

Расчетные данные сушильной камеры по зонам сушки

Параметры	Зоны		
	I	II	III
Температура изделия, поступающего в зону, в $^\circ\text{C}$	25	150	150
Температура изделия, выходящего из зоны, в $^\circ\text{C}$	150	150	110
Температура воздуха в $^\circ\text{C}$	60	120	110
Средняя температура изделия в зоне в $^\circ\text{C}$	85	150	130
Время нахождения изделия в зоне в мин	4	4	4
Теплоемкость изделия в $\text{ккал}/\text{кг} \cdot \text{град}$	0,12	0,12	0,12
Облучаемая поверхность за 1 ч	140	140	140
Отношение времени сушки в каждой зоне к общему времени сушки	1:3	1:3	1:3

Плотность лучистого потока первой зоны рассчитывается по формуле

$$E_I = \frac{6000 \cdot 0,12 (150 - 25) 60}{4} + 20 (85 - 60) 840 \approx 4958 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$$

Плотность лучистого потока второй зоны, в которой температура изделия на входе и выходе не меняется, подсчитывается по формуле

$$E_{II} = \frac{20 (150 - 120) 840}{0,85 \cdot 420} = 1410 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$$

Плотность лучистого потока третьей зоны по формуле

$$E_{III} = \frac{\frac{6000 \cdot 0,12(150 - 110) 60}{4} + 20(130 - 110) 840}{0,85 \cdot 420} \approx 2150 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Тепло, затраченное на нагрев кабин Q_n в каждой зоне, составляет:

$$Q_{nI} = 4958 \cdot 140 \frac{1}{3} = 231\,370 \text{ ккал/ч};$$

$$Q_{nII} = 1410 \cdot 140 \frac{1}{3} = 65\,330 \quad \text{»};$$

$$Q_{nIII} = 2150 \cdot 140 \frac{1}{3} = 100\,330 \quad \text{»}.$$

Полное количество тепла по всем зонам составляет:

$$Q_n = 231\,370 + 65\,330 + 100\,330 = 397\,030 \text{ ккал/ч.}$$

Подсчет потерь в сушильной камере.

1. Подсчитываются потери тепла в окружающую среду через стенки камеры.

Теплоотдающая поверхность стенок камеры равна:

$$F = 2 \cdot 3,4 \cdot 16,8 + 2 \cdot 3 \cdot 16,8 = 215 \text{ м}^2.$$

Температура наружных стенок и крыши $t_{ст} = 40^\circ \text{C}$; температура воздуха в цехе $t_{ц} = 25^\circ \text{C}$

$$Q_1 = 1 \cdot 215 (40 - 25) = 3225 \text{ ккал/ч.}$$

2. Определяем потери тепла на нагрев подвесок и конвейера Q_2 .

Вес одной подвески равен 10 кг. За 1 ч через камеру проходит 30 подвесок общим весом 300 кг.

Вес 1 м конвейера составляет 12 кг. За 1 ч через камеру проходит 84 м конвейера общим весом.

$$G'' = 12 \cdot 84 = 1008 \text{ кг/ч};$$

$$G = G' + G'' = 300 + 1008 = 1308 \text{ кг/ч.}$$

Начальная температура подвесок и конвейера $t_1 = 25^\circ \text{C}$, конечная $t_2 = 110^\circ \text{C}$, откуда

$$Q_2 = 0,12 \cdot 1308 (110 - 25) = 13\,300 \text{ ккал/ч.}$$

3. Потери тепла на нагрев краски и испарение растворителя Q_3 подсчитываются исходя из принятых в задании условий, а также следующих данных:

G_p — вес испаряемого из пленки растворителя 30 кг/ч;

r — теплота испарения растворителя 90 ккал/кг;

C — теплоемкость пленки 0,5 ккал/кг · град.

Таким образом,

$$Q_3 = 0,5 \cdot 150 (110 - 25) + 30 \cdot 90 = 9090 \text{ ккал/ч.}$$

4. Потери тепла с воздухом, входящим через открытый проем, подсчитываются по формуле

$$Q_4 = qC\delta(t_b - t_n),$$

где

q — количество воздуха, входящего через открытый проем, в кг/сек;

C — теплоемкость воздуха ($C = 0,24$ ккал/кг · град);

δ — коэффициент, учитывающий заполнение проема и равный 0,3;

t_b — средняя температура воздуха внутри камеры, равная 120°C ;

t_n — температура наружного воздуха, равная 25°C .

В данном случае принимается ширина проема $b = 2,5$ м; высота проема $H = 2,8$ м; плотность наружного воздуха $\rho_n = 1,15$ кг/м³; плотность воздуха внутри камеры $\rho_{вн} = 0,87$ кг/м³. Тогда

$$q = 1,92 \cdot 2,5 \sqrt{2,8^3} \cdot \sqrt{\frac{(1,15 - 0,87) 1,15 \cdot 0,87}{\left(\sqrt[3]{0,87} + \sqrt[3]{1,15}\right)^3}} = 4,21 \text{ кг/сек};$$

$$q = 4,21 \cdot 3600 = 15150 \text{ кг/ч.}$$

Для одного проема

$$Q_4 = 15150 \cdot 0,24 \cdot 0,3 (120 - 25) = 103\,000 \text{ ккал/ч};$$

для двух проемов потери тепла с воздухом составят:

$$103\,000 \cdot 2 = 206\,000 \text{ ккал/ч.}$$

Потери тепла, уходящего с воздухом, необходимым для создания безопасной концентрации паров растворителя, меньше потерь с воздухом, входящим через торцовые проемы, и в расчет не принимаются. Сумма всех тепловых потерь составляет:

$$Q' = (3225 + 13\,300 + 9090 + 206\,000) 1,2 \approx 278\,000 \text{ ккал/ч.}$$

Необходимая суммарная мощность горелок инфракрасного излучения определяется по формуле

$$N = \frac{397\,030 + 278\,000}{0,53} 1,15 \approx 1\,464\,700 \text{ ккал/ч};$$

к. п. д. всей сушильной установки определяется по формуле

$$\eta = \frac{397\,030}{397\,030 + 278\,000} \approx 0,59.$$

В заключении следует отметить, что независимо от выполнения теплового расчета терморadiационной сушильной установки разработке проекта должно предшествовать лабораторное исследование процесса сушки конкретного изделия в условиях, близких к производственным. Данные этих исследований должны быть положены в основу проектно-конструкторской разработки сушильной установки.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Сушка древесины инфракрасными лучами имеет свои специфические особенности.

Дерево представляет материал, обладающий малой теплопроводностью. Поэтому облучать его поверхность при сушке следует равномерно с двух сторон.

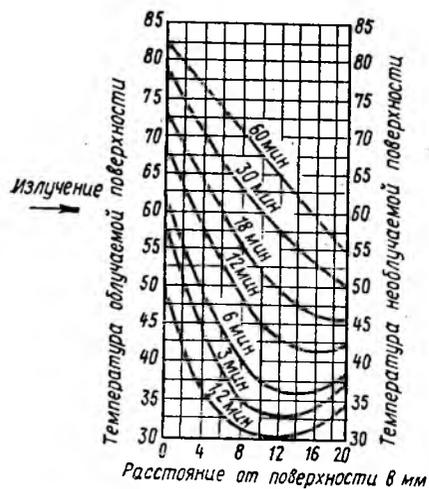


Рис. 110. Распределение температуры в дубовой доске толщиной 19 мм

На рис. 110 приведен график распределения температур по толщине дубовой доски, облучаемой с одной стороны с интенсивностью $1,24 \text{ кВт/м}^2$. Одновременно эта доска обдувалась воздухом с температурой 46°C . Начальная температура составляла 31°C . Из кривых видно, что с первых минут облучения температура на наружной стороне доски быстро повышалась, а в среднем ее сечении оставалась первоначальной, т. е. 31°C . На противоположной стороне доски температура повышалась за счет конвективного теплообмена с воздухом.

Неравномерность сушки приводит к короблению древесины и образованию на ней трещин.

Весьма положительно на сушку древесины влияет коротковолновое инфракрасное излучение. Известно, что глубина проникания коротковолнового инфракрасного излучения в твердую древесину (вишня, грецкий орех, груша) составляет до 1 мм, а в мягкую (сосна, пихта, ель) доходит до 7 мм. Чтобы избежать деформацию древесины, ее не следует подвергать длительному непрерывному и интенсивному излучению, лучше обеспечить постепенное выравнивание температуры и влажности по сечению данного изделия.

Заслуживает внимания прерывистая сушка. При этом во время облучения вода находящаяся на поверхности быстро испаряется. Во время перерыва между периодами облучения вода изнутри древесины поступает к ее внешней поверхности.

Такая технология сушки уменьшает расход топлива. Инфракрасное облучение можно применять и для склейки деревянных деталей. На высушенную инфракрасным излучением поверхность древесины наносят слой клея, который проникает в освободившиеся от влаги поры и хорошо пропитывает поверхность, что в конечном счете обеспечивает прочное и плотное склеивание.

Известно также применение инфракрасного излучения для сушки древесных опилок. Эффект сушки здесь повышается за счет постоянного перемешивания опилок и двухстороннего их облучения.

В описанных выше примерах использовались электрические инфракрасные излучатели. Очевидно, для этих же целей с большим экономическим эффектом могут применяться газовые инфракрасные излучатели.

Институтом Ленгипроинжпроект проведена экспериментальная работа по сушке деревянных ящиков газовыми инфракрасными излучателями. Для эксперимента была построена сушильная камера с установкой на боковых стенах газовых горелок инфракрасного излучения типа КГ-3. Процесс сушки деревянных ящиков после мойки осуществлялся в течение 3 мин.

На основании экспериментальных данных на Ленинградском хлебозаводе № 14 запроектировано конвейерное сушило деревянных ящиков.

На одном из саратовских комбинатов по проекту института Гипронигаз смонтирована установка с газовыми горелками инфракрасного излучения для сушки бочек. Замена конвективной сушки на радиационную позволила повысить качество сушки. Установка позволяет за 8—10 мин сушить одновременно четыре бочки.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Продолжительность сушки керамических изделий (фарфора, фаянса, облицовочных плиток и др.) конвективным методом весьма значительна. Существующие сушильные установки громоздки, ненадежны в эксплуатации и не дают возможности применить автоматическое управление сушкой и создать поточные автоматические линии производственного процесса.

Длительные сроки сушки изделий тонкой керамики определяются не технологическими требованиями, а конструктивными и теплотехническими недостатками сушил, в которых использу-

ется конвективно-тепловой метод сушки изделий в общем потоке.

Большие возможности интенсификации процесса сушки открываются при радиационном нагреве. При этом достигается практически полное удаление влаги из изделий, что важно для повышения механической прочности полуфабриката, особенно при однократном обжиге фарфора, фаянса и облицовочных плиток.

В институте газа АН УССР проведены исследования радиационной газовой сушки изделий тонкой керамики. Для сушки изделий были использованы газовые горелки с излучающим керамическим насадком.

При исследовании радиационной газовой сушки изделий тонкой керамики фарфор производился методом отливки в гипсовые формы массой со следующей характеристикой: абсолютная влажность шликерной массы составляла 45—46%, толщина черепка 1,5—1,6 и 2,4—2,5 мм. Фаянсовые изделия изготовлялись методом формовки на ручных станках и полуавтоматах из массы фаянсового завода (абсолютная влажность формовочной массы составляла 32—33%, толщина черепка — 4,5—5 мм). Облицовочные плитки изготовлялись на колено-рычажных прессах из пресс-порошка плиточного завода (абсолютная влажность пресс-порошка была 9—10%, толщина плиток — 4,8—5 мм).

Экспериментальные данные по радиационной газовой сушке изделий тонкой керамики и их сравнение с существующими в тонкокерамической промышленности показателями приведены в табл. 30. (длительность сушки в мин).

Таблица 30

Сравнительные данные по времени сушки радиационным и конвективным методами

Изделие	Метод сушки	
	радиационный	конвективный
Фарфор (толщина 1,4—1,5 мм)	7—8	—
Фарфор (» 2,4—2,5 »)	11—12	75—90
Фаянс	26—28	120—150
Облицовочные плитки	6—7	720

Анализ табл. 30 показывает, что радиационный метод позволяет в 5—10 раз сократить длительность сушки керамических изделий. Используя радиационную сушку, можно, кроме того, легко достигнуть предельных скоростей сушки.

Сушильная камера (рис. 111), разработанная Харьковским плиточным заводом, имеет (с учетом вспомогательных устройств: привода, натяжной станции и т. д.), длину 14,35, высоту

1,8, ширину 1,38 м. Сушильная камера сваривается из профильной и угловой стали. Стены и под теплоизолированы. Газовые горелки устанавливаются на своде.

Камера имеет конвейер с проволочной лентой шириной 1,1 м с толщиной проволоки 2,5—3 мм. Вне камеры проволочная лента движется на роликах, а в камере — на чугунных плитах, являющихся ее подом. Скорость движения ленты 0,028 м/сек.

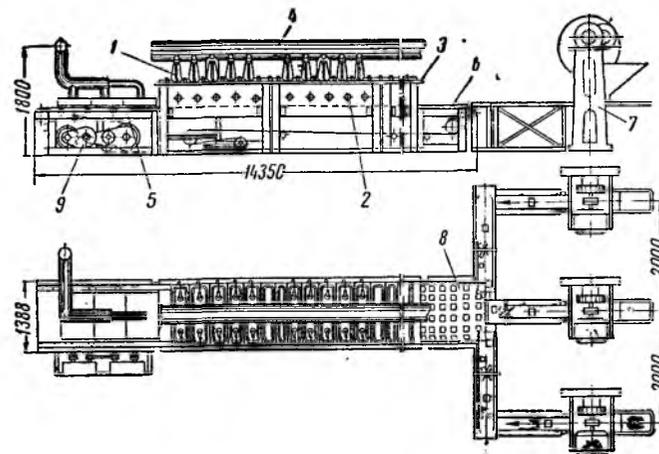


Рис. 111. Схема радиационной сушильной камеры для сушки керамических плиток

1 — горелка с излучающей керамической насадкой; 2 — секция камеры; 3 — газопровод; 4 — трубопровод для отвода продуктов сгорания; 5 — секция охлаждения; 6 — секция загрузки; 7 — пресс; 8 — проволочный транспортер; 9 — привод

Таблица 31

Технико-экономические показатели работы радиационных и конвективных сушильных камер

Показатель	Сушильная камера	
	радиационная	конвективная
Метод подачи плиток от прессов к сушильной камере	Автоматический	Ручной
	»	»
Метод загрузки сушильной камеры	3	6
Количество людей, обслуживающих три прессы и сушильную камеру	6,6	720
Время сушки в мин	Нет	До 5%
Брак по механическим повреждениям (при укладке в сушильную камеру, транспортировке внутри камеры и т. д.)	0,34	1,2
Стоимость топлива на обогрев сушильной камеры за 1 ч. руб.		

Одна сушильная камера может автоматически загружаться плитками от трех прессов одновременно. Производительность печи 73,5 м² плиток в 1 ч (18 плиток в 1 мин от каждого пресса).

В табл. 31 приведены технико-экономические показатели радиационной и конвективной сушильных камер.

Инфракрасный нагрев нашел применение при изготовлении тонкой керамики. В этом случае материал прогревается на малую толщину (излучение оказывает только поверхностное действие).

При поточном изготовлении тарелок инфракрасные лучи позволяют резко повысить производительность, сократить время сушки с 24 ч до 15 мин. Хорошие результаты инфракрасный нагрев дает также при сушке гипсовых форм.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Применение горелок инфракрасного излучения в строительстве идет в двух направлениях: непосредственно на строительных объектах и в строительной индустрии. На строительных объектах инфракрасные горелки могут применяться для:

- а) сушки зданий и помещений при отделочных работах;
- б) прогрева кладки при производстве работ в зимнее время;
- в) сушки отделанных, сильно увлажненных мест строительных конструкций;
- г) местной подсушки при производстве ремонтных работ;
- д) прогрева поверхностей перед нанесением гидроизоляции;
- е) разогрева различных строительных материалов;
- ж) обогрева рабочих мест строителей и монтажников;
- з) отопления временных сооружений на строительных объектах;
- и) искусственного старения железобетона, омоноличивания стыков, прогрева арматуры перед заливкой бетона и т. д.

Сушка помещений при отделочных работах в обычных условиях является весьма продолжительной. Она задерживает сроки сдачи объектов в эксплуатацию. Особенно медленно сушка помещений идет в осенне-зимний и весенний периоды.

Для ускорения процесса сушки применяют различные временные тепловые установки с низким к. п. д. и сушку ведут конвективным методом.

Недостатком конвективной сушки, в особенности в высоких помещениях, является то, что подогретый воздух, поднимаясь вверх, значительную часть своего тепла передает потолку, а стены (особенно в нижней наиболее влажной, части) получают незначительную часть тепла.

В помещениях с большим объемом и особенно при большой кратности вентиляции при конвективной сушке большое количество тепла теряется с уходящим из помещения воздухом.

Этот недостаток устраняется, когда сушка производится инфракрасными лучами.

Для сушки помещений после отделочных работ могут применяться различные типы газогорелочных устройств инфракрасного излучения.

Для небольших помещений рекомендуется применять горелки типа «Фонарь» саратовского института Гипронегаз (см. главу II).

Данная горелка обладает круговым (на 360°) излучением и может одновременно просушивать всю комнату. Горелка устанавливается в центре комнаты на высоте, обеспечивающей равномерную сушку всей поверхности стен комнаты. Для сушки углов в помещениях дополнительно могут устанавливаться небольшие горелки с плоскими излучающими насадками.

В помещениях с большой площадью стен и потолков рекомендуется проводить сушку группой горелок инфракрасного излучения с плоскими излучающими насадками, устанавливаемыми на минимальной высоте от пола и на таком расстоянии от стен, чтобы плотность излучения соответствовала максимально допустимой величине (в зависимости от влажности и толщины штукатурки, облицовки и т. д.). Это расстояние составляет 500—800 мм.

Мощность излучателей и расстояние от просушиваемых ограждающих конструкций необходимо подобрать так, чтобы температура на этих конструкциях не достигала 100°С. В противном случае может произойти растрескивание штукатурки. При сушке стен в тех местах, где они соприкасаются с деревянными конструкциями горелки, необходимо устанавливать не менее, чем на 60 см от деревянных конструкций. Весьма удобно и выгодно производить сушку передвижными установками инфракрасного излучения. Установка состоит из тележки, рамной конструкции на двух колесах, баллона для сжиженного газа емкостью 50 или 80 л, неподвижной или телескопической штанги, на которой крепится одна или две горелки инфракрасного излучения, редуктора типа РДГ-6М, резино-тканевого шланга.

Техническая характеристика одной из конструкций передвижной установки инфракрасного излучения ОП-2 следующая:

Тепловая нагрузка инфракрасной горелки в ккал/ч	4000
Максимальная высота установки горелки (при выдвинутой до конца штанге) в мм	2500
Расход газа (сжиженного с $Q_H^P = 22\,000$ ккал/м ³) в м ³ /ч	0,18
Вес установки (с баллоном 50 л, наполненным газом) в кг	85
Регулятор давления	РДГ-6М
Давление газа перед соплом горелки в мм вод. ст.	250—300
Площадь, занимаемая установкой, в м ²	0,36

На рис. 112 приведена передвижная установка с горелкой инфракрасного излучения, разработанная институтом Мосгаз-

проект. В отличие от ОП-2 установка имеет поворотную телескопическую штангу, позволяющую перемещать горелку в нижнее положение (на уровень пола) для сушки плитусов. Газ от редуктора подается к горелке по телескопической штанге. На рис. 113 показана передвижная установка фирмы «Антаргаз». Установка состоит из тележки, выполненной из легких метал-

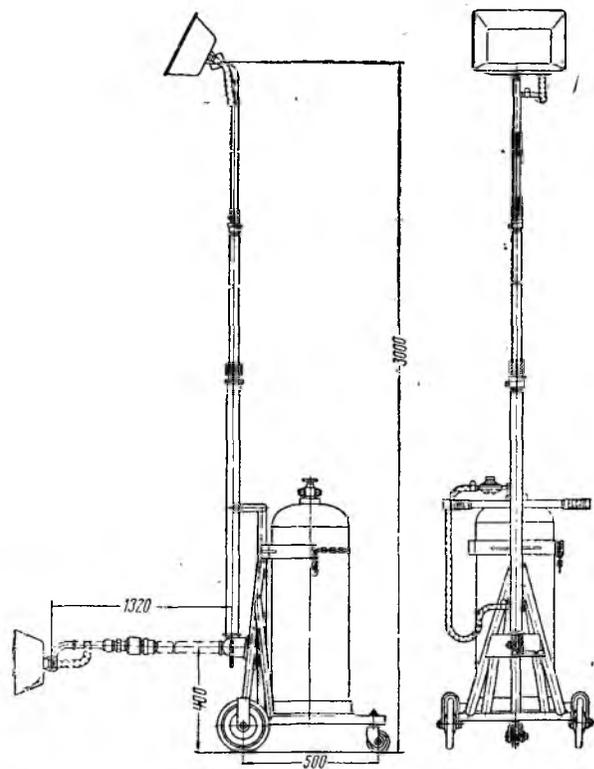


Рис. 112. Передвижная установка с горелкой инфракрасного излучения института Мосгазпроект

лических труб, баллона с регулятором давления и одной или нескольких горелок. При сушке больших производственных помещений необходимо иметь установки, позволяющие вести тепловую обработку больших поверхностей. Применение одиночных горелок здесь нецелесообразно. Горелки объединяют в блоки, образуя общую излучающую панель больших размеров.

На рис. 114 показана передвижная рамная установка с блочной излучающей панелью и подъемным механизмом для передвижения ее по вертикали. Количество блоков выбирается в зависимости от фронта проведения работ.

Расстояние до стен определяется в зависимости от степени влажности материала, толщины слоя штукатурки, характера материала, на который нанесена штукатурка, и количества горелок в блоке. От этих же факторов зависит и выбираемый режим сушки. Чем толще просушиваемый слой и чем больше его влажность, тем менее интенсивной должна быть сушка в начальный период. В этом случае предпочтительна импульсная сушка.

Для просушки зданий электростанций во время строительства использовались панельные беспламенные горелки института Гипронефтемаш (см. рис. 57), которые собирались в блоки.

При работе горелок инфракрасного излучения на природном газе горелки можно подключить к внутридомовой газовой разводке. Если постоянная внутридомовая сеть к моменту проведения сушильных работ не закончена, то необходимо в лестничных клетках проложить временные газовые стояки с отводами для подключения горелок. На каждом отводе должен устанавливаться запорный кран. На прокладку временного газопровода необходимо получить разрешение от соответствующих газовых служб.

При работе на сжиженном газе баллоны должны защищаться от облучения горелками. Хранение, транспортировка и установка баллонов должны производиться в соответствии с действующими Правилами безопасности Госгортехнадзора.

Помещения, в которых производится сушка штукатурки стен и потолков, должны тщательно проветриваться. При недостаточном воздухообмене нарушается работа излучателей и создается опасность отравления угарным газом обслуживающего персонала. Лучистый теплообмен уменьшается, так как воздух, насыщенный влагой, поглощает лучистую энергию.

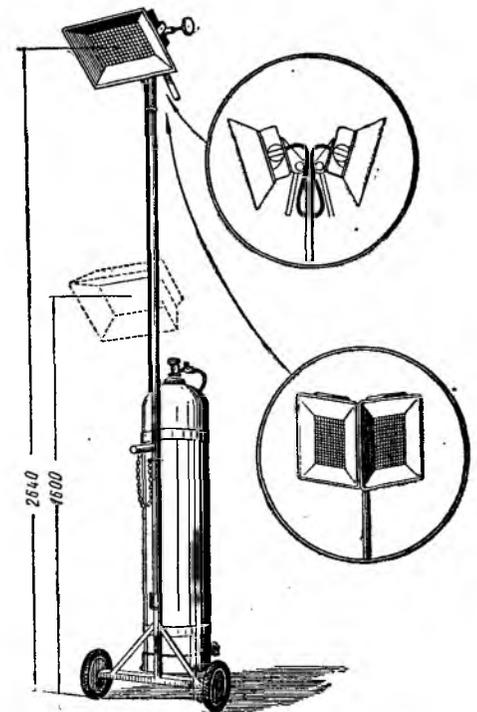


Рис. 113. Передвижная установка с горелками инфракрасного излучения

Сушку необходимо начинать с нижней части стен. В этом случае теплый воздух просушивает одну из стен, потолок и карнизы.

Расстояние между центрами горелок с тепловой нагрузкой около 4000 ккал/ч не должно превышать 1 м. По мере просухания низа стены горелки перемещают вверх, приближая их к потолку и карнизу.

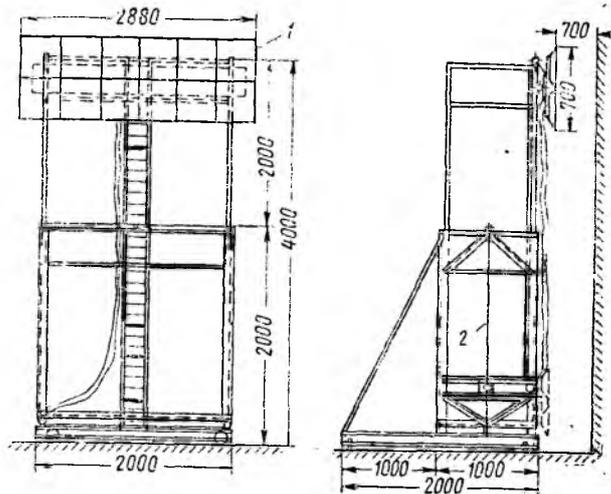


Рис. 114. Передвижная установка с блоком горелок инфракрасного излучения для сушки больших производственных помещений

1 — блок горелок (излучающая панель); 2 — подъемное устройство

Температура стен, на которых находится электропроводка, должна быть не выше 50°С, так как повышенная температура может повредить изоляцию.

Сушку штукатурки следует производить до ее шпаклевки, так как шпаклевка значительно затрудняет выход влаги. Как показали опыты, время сушки прошпаклеванной штукатурки увеличивается почти в 2 раза. При сушке обоев и линкруста излучатели располагают не ближе 1,5 м от стен. На комнату площадью 25 м² достаточно двух установок ОП-2 для сушки обоев в течение 3—4 ч.

Аналогично сушат помещения после окраски и побелки.

Заслуживают внимания данные, полученные институтом Гипренигаз при сушке штукатурки в помещениях горелкой типа «Фонарь». Горелка была установлена в комнате размером 4,35 × 2,45 × 2,7 м, в которой имелись окно размером 1,6 × 1,3 м и дверь размером 2 × 0,8 м. Температура наружного воздуха при

проведении опыта колебалась от —20 до —25°С. Температура штукатурки замерялась на каждой стене в трех точках: внизу, в середине и наверху. Стены изготовлены из гипсолитовых плит толщиной 10 см, на которые была нанесена штукатурка.

Температура штукатурки измерялась при помощи медно-константановых термопар. Влажность стен определялась перед началом сушки, а затем через каждые сутки.

На рис. 115 показаны кривые изменения температур штукатурки в процессе сушки по показаниям трех термопар (T_1 , T_2 и

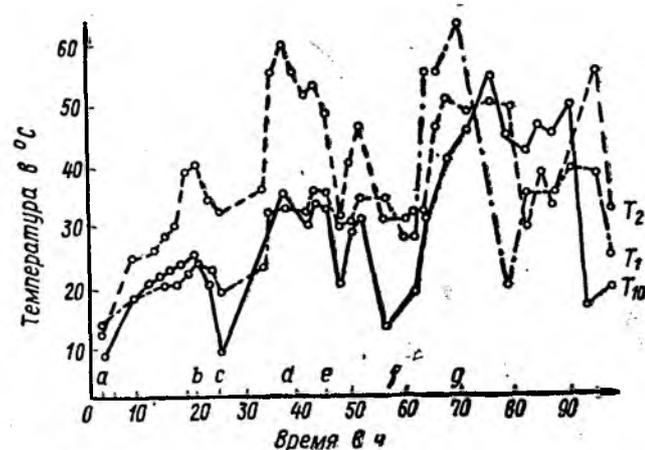


Рис. 115. Изменения температуры штукатурки в процессе сушки

T_{10}), расположенных на одной и той же стене на различном расстоянии от пола.

Распределение температур по высоте неравномерное. Низ стены прогревается слабее других участков (T_{10}), так как находится в зоне менее интенсивного облучения. Средняя часть стены нагревается до более высокой температуры (T_1) прямым облучением (горелка установлена на уровне термопары T_1). Наиболее высокую температуру имеют верхние участки (T_2), ибо они обогреваются не только излучением, но и горячими продуктами сгорания. Из этих данных видно, что сушку надо производить при расположении горелки ближе к полу, что было обеспечено изменением высоты подставки до 1 м. Падение температуры на графике вызвано отключением горелок и интенсивным проветриванием помещения. Во время опыта производилось также измерение температур в толще штукатурки на одинаковой высоте 135 см от уровня пола.

Термопары были вмонтированы на глубине 2 и 15 мм. Результаты испытаний показали, что повышение и понижение тем-

Технико-экономические показатели приборов, применяемых для сушки штукатурки

Показатель	Электрокалорифер (НИИОМГ)	Мангал коксовый (жаровня)	Инфракрасный излучатель (электрический с карборундовыми излучателями)	Инфракрасный излучатель из горелок ГИИ-12, ГИИ-14 института Гипронингаз
Вес нагревателя в кг	130	26	50	18—22
Расход электроэнергии в квт·ч	15,8	—	11,5	—
Расход топлива в кг/ч	—	1,8	—	Сжиженного газа 1,8 Природного 2,5—3 м³/ч
Стоимость энергии, расходуемой в 1 ч, в коп.	31,6	7	23	На сжиженном газе 19,8 На природном 3,2—3,9
Стоимость энергии для сушки 1 м² штукатурки в руб.	1,3	1,24	0,53	На сжиженном газе 0,286 На природном — 0,09

Примечание. При составлении таблицы использовались следующие документы и данные: «Указания по сушке штукатурки» (ВНИИОМС), 1947 г.; стоимость 1 м³ природного газа — 1,3 коп.; 1 кг сжиженного газа — 11 коп.; стоимость 1 квт·ч электроэнергии — 2 коп.; стоимость 1 т кокса — 54 руб. (по действующему ценнику).

пературы в различных слоях штукатурки происходит одинаково, максимальная разность их составила 6,5°.

Опытная сушка проводилась в течение 90 ч. Первоначальная влажность штукатурки составляла 18, а влажность гипсолитовых плит — 19%. После 48 ч сушки влажность штукатурки уменьшилась до 3,59% на стене из одной гипсолитовой плиты и до 3,9% на стене из двух гипсолитовых плит. Влажность гипсолитовых плит уменьшилась до 6%. Через 90 ч работы влажность штукатурки упала соответственно до 1,84 и 1,93%. Практически сушку можно было прекращать через 72 ч. Проведенный отбор воздуха при сушке показал, что воздух в помещениях отвечает санитарно-гигиеническим требованиям.

В табл. 32 приведены технико-экономические показатели инфракрасного излучения для целей сушки.

Из табл. 32 видно, что стоимость сушки 1 м² штукатурки горелками инфракрасного излучения меньше, чем стоимость сушки другими приборами.

Приведенные показатели отражают в основном сравнительные данные по стоимости.

Технико-экономические показатели при различных методах сушки штукатурки

Способы сушки	Электрокалориферами	Мангалами коксовыми	Горелками инфракрасного излучения			
			ГИИ-12	ГИИ-14	ГК-1-38	
					на сжиженном газе	на природном газе
Объем сушки в млн. м²	15	15	15	15	15	
Необходимое количество приборов	8000	175 000	5000	5000	5000	
Капитальные затраты в тыс. руб.	280	1750	315	335	232,5	
Капитальные затраты на приобретение баллонов из расчета 1 баллон на 1 горелку	—	—	93,5	—	93,5	—
Стоимость топлива в тыс. руб.	4540	30 625	1780	294	1780	294
Амортизационные отчисления в тыс. руб.	28	175	41	33,5	33	23
Годовые эксплуатационные расходы в тыс. руб.	4568	3800	1821	327,5	1813	317
Расчетные затраты (срок окупаемости затрат 6 лет) в тыс. руб.	4625	31 098	1874	385	1852	356

Институтом ВНИИЖелезобетон были проведены исследовательские работы по определению возможности сушки гипсоцементных панелей горелками инфракрасного излучения.

Процесс сушки и твердения гипсоцементных панелей заключается в испарении лишней влаги и обеспечении условий для ускорения процесса гидратации. При этом часть механически связанной воды переходит в химически связанную. Содержание химически связанной воды в гипсе для рассматриваемого случая достигает примерно 18%.

Испытания проводились на гипсоцементных образцах толщиной 30 мм, изготовленных из смеси гипса, пуццоланового цемента с соответствующей добавкой трепела.

В качестве заполнителей применялась древесная игольчатая стружка, керамзитовый песок и другие добавки.

Испытываемые образцы облучались горелкой инфракрасного излучения с насадком площадью 525 см². Горелка при односто-

ронней сушке располагалась на расстояниях 170—200 мм от образца. При расположении горелки на расстоянии 200 мм от образца 18%-ная влажность (первоначальная 32%) достигалась спустя 28 мин. При этом в интервале от 1 до 22 мин изменение влажности происходило по прямой, т. е. скорость сушки была постоянна. Температура тела плитки непрерывно увеличивалась и внутри плитки наблюдался температурный градиент. Наибольшая температура, как и следовало ожидать, находится в центральной части. По мере удаления от центра температура падает. Эти явления соответствовали жесткому режиму сушки, который обычно наблюдается при интенсивной радиационной сушке. При увеличении расстояния от излучателя до плитки продолжительность сушки до 18%-ной влажности возрастала с 19 до 28 мин.

Определялось также распределение влажности по плоскости и толщине гипсобетонной пластины в сечениях через 10 мм после односторонней сушки в течение 30 мин. В этом случае наименьшая влажность наблюдалась в центре пластины в переднем сечении пластины. В то же время возрастание влажности было отмечено в направлении движения лучистого потока. В переднем сечении средняя влажность составила 14,3%, во втором — 16,3%, в третьем — 17,9%. Имея данные по распределению температур и влажностей, можно определить эффективную площадь облучения пластины. Из сопоставления полей распределения температур и влажности было определено, что при расположении горелок на расстоянии 170—200 мм от плитки площадь равномерного облучения ее в 6,65 раза больше излучающей панели горелки. Это соотношение позволяет выбрать расположение горелок при проектировании сушильной установки.

Как показали испытания сушки образцов, прочность панелей соответствовала предъявляемым к ним требованиям. При этом независимо от того, как облучились образцы — с одной или с двух сторон, на близком или на далеком расстоянии — одной и той же влажности соответствует одна и та же прочность.

В процессе сушки пластин проводились наблюдения за образованием трещин. Опыты показали, что при принятых режимах сушки трещины на изделиях не появлялись.

Ниже приводится расчет открытой конвейерной установки для сушки панелей с учетом полученных экспериментальных показателей. При этом принимается, что продолжительность облучения в первой зоне наибольшая и равна t_1 мин. После этой зоны панель попадает в другие зоны облучения, равномерно расположенные вдоль конвейера.

Продолжительность нахождения панели в каждой из этих зон, а также в интервале между зонами равна t_2 мин.

Скорость движения панели — v м/мин; ширина панели — h .

Тогда длина первой зоны облучения будет равна:

$$L_1 = vt_1 \text{ м,}$$

площадь облучения 1-й зоны

$$S_1 = L_1 h = vt_1 h.$$

Для каждой из остальных зон и для каждого интервала между ними длина и площадь определяются из формул:

$$L_2 = vt_2;$$

$$S_2 = vt_2 h.$$

Число зон, а также интервалов между ними будет равно:

$$n = \frac{t - t_1}{2t_2},$$

где t — общая продолжительность сушки в мин.

Примем, что зона разбита на ряд полос длиной l м по направлению движения конвейера. Тогда площадь такой полосы будет равна: $lh = h$ (м²). Количество излучателей, приходящихся на такую площадь, определится:

$$m = \frac{h}{6,65ab}$$

где a и b — стороны излучающей панели горелки.

Количество горелок в первой зоне будет равно:

$$m_1 = mL_1 = \frac{hvt_1}{6,65ab}.$$

Число горелок в остальных зонах будет равно:

$$m_2 = mnL_2 = \frac{vh(t - t_1)}{2 \cdot 6,65ab}.$$

Общее количество горелок будет равно:

$$m_1 + m_2 = \frac{vh(t + t_1)}{13,3ab}.$$

Общее количество испаренной влаги равно:

$$G_{вл} = \frac{v\delta h\gamma(\omega_0 - \omega_k)}{100} \text{ кг,}$$

где γ — вес единицы объема сухого материала в кг/м³;

δ — толщина пластины в м;

ω_0 — влажность начальная в %;

ω_k — влажность конечная в %.

Расход газа определится по формуле

$$Q_r = \frac{v\delta h\gamma(\omega_0 - \omega_s) Q_r 60}{Q_H^p} \cdot \frac{t + t_1}{2t} \text{ м}^3/\text{ч,}$$

Q_p — низшая теплота сгорания в $\text{ккал}/\text{м}^3$ газа;
 Q_T — количество тепла, необходимое на 1 кг испаренной влаги в $\text{ккал}/\text{кг}$.

На основании лабораторных исследований была изготовлена установка, оборудованная газовыми горелками инфракрасного излучения.

Схема сушильной установки представлена на рис. 116.

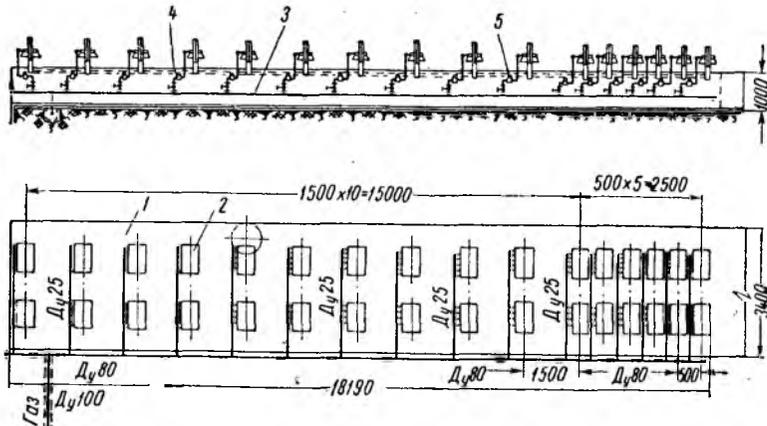


Рис. 116. Схема установки для сушки гипсоцементных панелей

1 — прокатный стан; 2 — горелки инфракрасного излучения; 3 — газовый коллектор;
 4 — газовый кран; 5 — соленоидный клапан

Станина установки выполнена из профильной стали, соединенной на сварке.

В подшипниковых опорах укреплены ролики, по которым перемещается транспортерная лента.

К верхним боковинам станины приварены вертикальные стойки, к которым специальными подъемными устройствами крепятся рамы с горелками инфракрасного излучения. Рамы с горелками могут перемещаться и устанавливаться на требуемом расстоянии от панелей. Газовый коллектор проложен вдоль стана и крепится к опорам. Газовый коллектор и горелки соединены между собой отводами. На каждом отводе установлены отключающий кран и соленоидный клапан. От отводов газ по медным трубкам поступает к горелкам инфракрасного излучения. Для сушки панелей применены горелки КГ-3-00 теплопроизводительностью 4250 $\text{ккал}/\text{ч}$. На первом участке непрерывной тепловой обработки расположено 9 рядов горелок по 6 горелок в ряду.

Далее вдоль стана расположено 7 рядов горелок по 8 горелок в ряду. Расстояние между рядами составляет 1800 мм. На стане установлено 110 горелок.

Подача газа к сушильной установке осуществляется от индивидуального узла редуцирования.

Сушильная установка имеет длину 18 и ширину 3,4 м. Горелки снабжены системой автоматики безопасности и дистанционным электрозажиганием. Электрозажигание выполнено таким образом, что пуск газа к горелкам через соленоидный клапан становится возможным только в случае накала спирали. Спирали каждого ряда горелок включены последовательно. В результате этого цепь всех спиралей одного ряда самоконтролируется. При обрыве цепи соленоидный клапан автоматически закрывается и поступление газа к горелке прекращается.

Зажигание происходит следующим образом: в первую очередь включается пакетный выключатель цепи зажигания одной группы горелок. Спирали горелок раскаляются, что фиксируется контрольными спиралями на пульте управления. Затем включается пакетный выключатель цепи соленоидного клапана, установленного на газопроводе данной группы горелок. Зажигание отдельных групп горелок производится последовательно.

Вся электроаппаратура размещается на специальном щите, располагаемом в цехе.

Во время заводских испытаний замерялись время пребывания панели на посту сушки, температура ее по толщине, начальная (до сушки) и конечная (после выхода из зоны облучения) и влажность панели.

Температуры панели замерялись медноконстантановыми термомпарами, установленными в трех точках по толщине панели через 15 мм. На рис. 117 представлены кривые разогрева панели по толщине. Из кривых видно, что температура на поверхности панели в зоне непрерывного облучения (через 6 мин) достигает 75°C , а на нижней стороне панели — $45-50^\circ\text{C}$.

В зоне прерывного облучения перепад температур между поверхностями составляет $30-25^\circ$.

Расстояние между насадком горелки и панелью в данном случае было 100 мм. Определялась начальная влажность после формовки и конечная после выхода панели из зоны сушки. Пробы на влажность отбирались шлямбуром по толщине панели в местах, где устанавливались датчики термомпар. Из графика

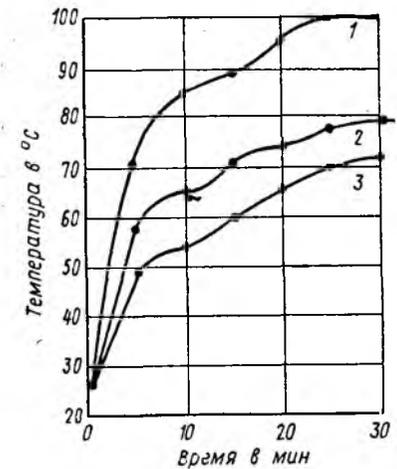


Рис. 117. Кривые разогрева гипсоцементной панели при прерывном режиме облучения

1 — облучаемая поверхность; 2 — центр изделия по толщине; 3 — необлучаемая поверхность

влажности по толщине панели (рис. 118) видно, что верхний слой толщиной около 10 мм имеет влажность 18%, которая необходима для нанесения на поверхность панели гидрофобного слоя шпаклевки. Необлученная поверхность имеет влажность 28%. При этом первоначальная влажность панели была на 8% выше нормы.

Необлучаемая сторона, облицованная древесноволокнистыми плитами, имела хорошую поверхность, а сама панель была несколько покороблена (примерно так же, как при конвективной сушке). На корабление панелей в данном случае оказало влияние разнородность материалов, из которых они изготовлены. При проведении испытаний было выявлено, что древесноволокнистые плиты, предварительно склеенные с деревянным каркасом, часто имели прогиб еще до формовки панели и до ее проката через панель стана.



Рис. 118. Кривая влажности по толщине панели при прерывном режиме сушки (расстояние до облучаемой поверхности $l=100$ мм)
I — верхний слой; II — средний слой; III — нижний слой

Применение двухстороннего обогрева уменьшило неравномерность влажности по толщине панели и устранило их коробление.

Примерный технико-экономический расчет сушильной ра-

диационной установки конвейерной линии одного из заводов показал, что экономический эффект от сокращения расхода газа вследствие перехода на радиационную сушку составил 1770 руб. в год. Экономия по электроэнергии 326 000 квт·ч (общей стоимостью 3260 руб.). При радиационной сушке снизилась трудоемкость процесса.

6. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЫПУЧЕСТИ СМЕРЗЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Работа промышленных предприятий, связанных с получением насыпных грузов железнодорожным транспортом, в зимнее время серьезно осложняется тем, что при перевозке грузов в условиях низких температур значительная часть этих грузов подвергается смерзанию и затрудняется их выгрузка.

Особенно сильно смерзаются руды (всех видов), рудные концентраты, песок, уголь и ряд других грузов, которые зачастую превращаются в монолит. В связи с этим выгрузка их из вагонов связана с большими трудностями, с затратой длительного времени и большого количества рабочей силы.

В связи с этим у нас в стране и за рубежом проводится целый ряд мероприятий, предупреждающих смерзаемость сыпучих грузов, а также разработаны устройства, обеспечивающие восстановление сыпучести грузов, перевозимых железнодорожным транспортом и прибывающих в пункты назначения в смерзшемся состоянии.

В порту Толедо (США) была смонтирована установка, оборудованная газовыми горелками инфракрасного излучения.

С обеих сторон железнодорожного пути установили 36 генераторов излучения так, что их лучи направлены непосредственно на стенки вагонов. Топливом для горелок служил пропан.

Применение этого способа позволило разогревать смерзшийся уголь почти вдвое быстрее, чем при разогреве угля паром в тепляках. Затраты на топливо снизились примерно на 40%.

В порту Ту-Харбора (США) была также введена в эксплуатацию установка, позволяющая разогревать смерзшуюся руду с помощью инфракрасных лучей до полного восстановления ее сыпучести.

Каждый вагон обогревали 48 генераторов инфракрасных лучей, смонтированных на специальных приспособлениях (в вагонных позиционерах). Генераторы работали на пропане и природном газе. Газовоздушную смесь на верхних генераторах зажигали электроискровым способом, а на остальных — вспомогательными горелками. Смесительные камеры горелок оборудованы соленоидными клапанами с электроприводом для регулирования подачи газа и воздуха, а также системой автоматического отключения подачи газа. Боковые генераторы инфракрасных лучей этой рудоразмораживающей установки отличаются от генераторов, установленных в предыдущем случае меньшими размерами и значительно большей площадью керамических насадок. Изменение конструкции боковых генераторов дало возможность расположить их в нижних рядах ближе к стенкам вагонов и направить поток инфракрасных лучей на участки наибольшего промерзания руды. Для обеспечения концентрированного направления инфракрасных лучей на обогреваемые ими стенки вагонов и на руду боковые и верхние генераторы оборудованы параболическими отражателями.

Установка для разогрева смерзшейся руды работает следующим образом: при подаче вагонов с рудой к установке определяют толщину смерзшейся руды, затем оператор, получив сообщение о прибытии руды и степени ее смерзаемости, автоматически открывает ворота установки и включает сигнал на подачу вагонов на место разогрева.

По окончании подачи вагонов до специального упора оператор по громкоговорящей связи дает указание обслуживающему персоналу отсоединить от вагонов локомотив и покинуть здание установки. Ворота в здание он может закрыть после того, как локомотив будет удален от здания примерно на 10 м. Затем опе-

ратор переключает реле времени подачи газа на позицию, соответствующую толщине слоя смерзшейся руды, и приводит в действие программное управление работой установки, которое последовательно включает приводы вагонных позиционеров и их выдвижных рам, а также приводы воздуходувки и соленоидных клапанов для подачи воздуха и газа в смесительные камеры генераторов. При этом сигнальные лампы на пульте управления показывают оператору, установились ли вагонные позиционеры и выдвижные рамы в требуемое положение у каждого вагона в отдельности. В процессе разогрева смерзшейся руды 48 генераторов излучают около 100 тыс. ккал/ч.

Температура воздуха в здании установки колеблется от 0° С на уровне пола до 90° С на высоте 4,6 м. В результате наблюдений за ходом разогрева руды было отмечено, что циркуляция и низкая температура воздуха на уровне пола не оказывают существенного влияния на интенсивность передачи тепла инфракрасными лучами на стенки обогреваемых ими вагонов.

Продолжительность разогрева зависит от мощности потока инфракрасных лучей, крупности и влажности руды и толщины смерзшегося слоя. На рудоразмораживающую установку в порту Ту-Харбора подают вагоны с рудой, толщина смерзшегося слоя которой составляет 50—125 мм.

По истечении заданного времени разогрева руды программное устройство на пункте управления автоматически отключает подачу газа, выключает воздуходувку и возвращает в исходное положение вагонные позиционеры и их выдвижные рамы, после чего оператор может открыть ворота в здании установки и включить сигнал на подачу локомотива для удаления вагонов с разогретой рудой.

Если вагонные позиционеры или их выдвижные рамы не возвращаются в исходное положение, вследствие чего нельзя подать локомотив, то используют ручное управление работой генераторов и вагонных позиционеров.

С вводом в эксплуатацию рудоразмораживающей установки было значительно ускорено выполнение работ по перегрузке руды с железнодорожного на водный транспорт, сокращено время простоя вагонов, уменьшена численность персонала, занятого на разогреве и выгрузке руды, а также существенно снижены расходы на разгрузку вагонов. На агломерационной фабрике завода Онайтез Стайтс Стил Корп в Янгстуне (США) введена в эксплуатацию установка для разогрева смерзшихся в железнодорожных вагонах угля, кокса, доломита, известняка и песка инфракрасными лучами.

Установка размещена в тепляке, представляющем собой легкий каркас с обшивкой из листов рифленого алюминия. Газовые излучатели смонтированы на металлических рамах, прикрепленных к стенам и потолку тепляка, а также между рельсами под вкатываемым в тепляк вагоном. Излучатели раз-

мещены в тепляке с учетом особенностей смерзания материала в разных частях вагона: подвагонные излучатели, предназначенные для разогрева материала в карманах разгрузочных люков и у наклонных стенок вагона, выделяют около 1 млн. ккал/ч; излучатели, смонтированные на стенах тепляка для разогрева материала у боковых стенок вагона, выделяют около 500 тыс. ккал/ч и верхние излучатели, используемые для разогрева верхней корки смерзшегося груза, выделяют 75 тыс. ккал/ч.

Пульт управления установкой находится вне тепляка и обслуживается одним рабочим.

Заслуживает также внимания французский опыт размораживания сыпучих грунтов в вагонах путем обогрева их газовыми инфракрасными излучателями. Установка имеет длину 72 м и делится на три зоны: обогревание, оттаивание и разгрузка. Топливом горелок инфракрасного излучения служат коксовый газ с теплотой сгорания 4900 ккал/м³ и давлением 100 мм вод. ст.

В 1961 г. в Советском Союзе начались исследования по восстановлению сыпучести смерзшихся грузов с помощью инфракрасных лучей. С этой целью были проведены опыты с электрическими лампами инфракрасного излучения для восстановления сыпучести смерзшейся в вагонетках глины. Применение лампового инфракрасного разогрева для восстановления сыпучести глины оказалось нерентабельным.

Институтом Мосгазпроект были проведены лабораторные исследования по оттаиванию смерзшихся грузов газовыми горелками инфракрасного излучения.

Для проведения исследований были взяты следующие материалы: железорудный концентрат, аглоруда, руда криворожская и песок со средней влажностью 10%.

Образцы из указанных материалов размером 40×40×40 см замораживались в специальном холодильном шкафу. Монолиты помещались в железный ящик со съемной боковой стенкой, что позволяло проводить испытания при непосредственном воздействии инфракрасных лучей на поверхность материала или через металлическую и деревянную стенки.

Температура по разным сечениям монолита определялась хромель-копелевыми термомпарами, заделанными в материал. Размораживание производилось при помощи горелок типа КГ-3.

Как видно из рис. 119, температурные кривые в монолите при разогреве концентрата, аглоруды и песка носят одинаковый характер. На рис. 120, 121 и 122 показано распределение температур в монолите железорудного концентрата при нагреве его через металлическую стенку и при непосредственном облучении поверхности. Как видно из рисунков, процесс разогрева концентрата при непосредственном воздействии инфракрасных лучей на его поверхность протекает более эффективно.

Зависимость температуры стенки от времени нагрева при разных расстояниях до излучателя изображена на рис. 123. Из

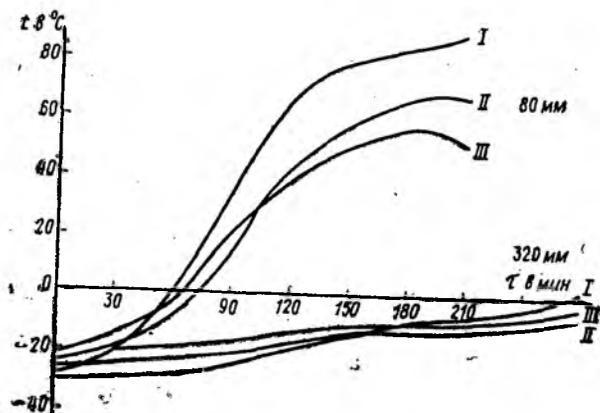


Рис. 119. Температурные кривые при разогреве монолита
I — песок; II — аглоруда; III — концентрат (влажность 8—10%)

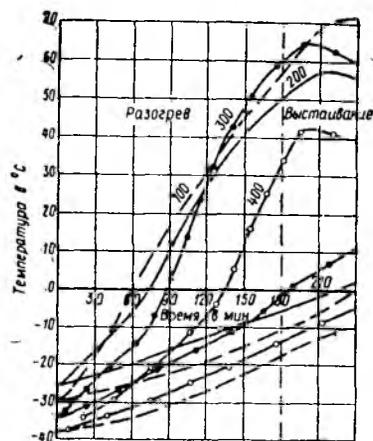


Рис. 120. Распределение температур в монолите железорудного концентрата при нагреве его через металлическую стенку на глубине 80 мм (верхние кривые) и 160 мм (нижние кривые) от стенки при различном расстоянии до излучателя. Влажность 8—10%

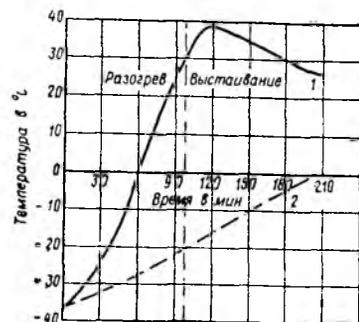


Рис. 121. Распределение температур в монолите железорудного концентрата при непосредственном облучении на расстоянии 200 мм до излучателя
1 — на глубине 80 мм; 2 — на глубине 160 мм от поверхности

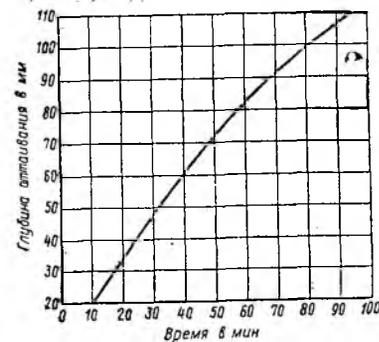


Рис. 122. Глубина оттаивания монолита железорудного концентрата с влажностью 9% при непосредственном облучении поверхности с расстоянием до излучателя 200 мм

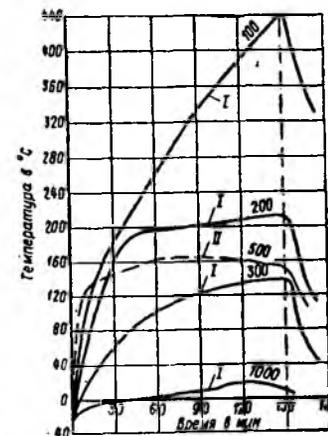


Рис. 123. Зависимость температуры стенки от времени нагрева и расстояния до излучателя в мм
I — металлическая стенка; II — деревянная (бортовая) стенка вагона

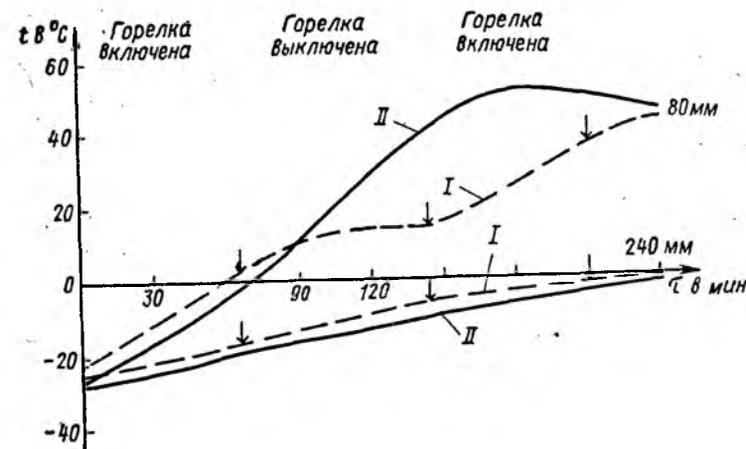


Рис. 124. Кривые температур в монолите при периодической и непрерывной работе горелки инфракрасного излучения (материал — железорудный концентрат)

I — периодический нагрев (время работы 2 и 10 мин); II — непрерывный нагрев (время работы 2 и 45 мин)

рисунка видно, что температура поверхности деревянной стенки растет по времени более интенсивно, чем металлической, даже при меньших плотностях облучения (при больших расстояниях до излучателя). Это объясняется более низкой теплопроводностью дерева по сравнению со сталью. На рис. 124 показано распределение температур в монолите концентрата при периодической и непрерывной работе инфракрасной горелки.

Как видно из графика, при периодическом режиме время работы горелки значительно сокращается. Во всех случаях после прекращения обогрева наблюдалось повышение температуры оттаиваемого материала по всем слоям за счет тепла, аккумулированного металлической стенкой и оттаявшей частью материала.

На основании проведенных испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Во всех случаях облучения смерзшихся материалов происходит эффективный разогрев верхнего слоя. Разогрев последующих слоев идет за счет теплопроводности материала.

2. После выключения излучающей установки продолжается разогрев материала в глубину за счет тепла, аккумулированного металлической стенкой, и оттаявших слоев. Поэтому периодический режим работы установки является более экономичным.

3. При разогреве смерзшихся материалов через металлическую стенку горелками инфракрасного излучения КГ-3 расстояние до излучателей должно находиться в пределах 100—300 мм, при непосредственном воздействии инфракрасных лучей на поверхность материала в пределах 200—300 мм.

На одном из металлургических заводов была смонтирована экспериментальная установка по разогреву смерзшихся грузов газовыми инфракрасными горелками.

Эта установка (рис. 125) позволяет разогревать смерзшиеся грузы в железнодорожном полувагоне грузоподъемностью 72 т с металлическими бортами.

Она состоит из нижних, верхних и боковых панелей с смонтированными в них горелками инфракрасного излучения типа ГИИ-3 теплопроизводительностью 6400 ккал/ч (по шесть горелок в каждую панель).

Нижние, подвагонные панели, предназначенные для обогрева металлических люков вагона, смонтированы на специальных подвижных направляющих. Верхние панели смонтированы в подвижной раме, подвешенной на тросах, предназначены для обогрева материала, находящегося в вагоне, а боковые находятся на пантографах, обеспечивающих их перемещение. Для понижения давления природного газа с 6 кгс/см² до 130 мм вод. ст., необходимого для нормальной работы горелок, имеется узел редуцирования.

Зажигание горелок осуществляется от электроспиралей. Общий расход газа на установку составляет 300 м³/ч.

Испытания установки показали:

1. Разогрев смерзшегося концентрата с влажностью 8—10%, газовыми инфракрасными излучателями значительно сокращает время размораживания по сравнению с разогревом в существующих тепляках, при тех же условиях.

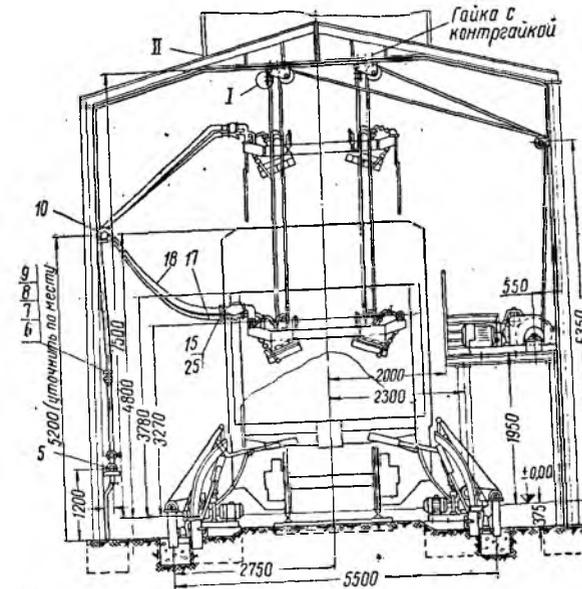


Рис. 125. Общий вид экспериментальной установки по разогреву смерзшихся сыпучих грузов

2. Применение боковых панелей с инфракрасными излучателями для деревянных вагонов исключается из-за возможности возгорания дерева.

3. Верхние панели горелок необходимо разъединять для свободного выхода продуктов сгорания.

4. Инфракрасные лучи не оказывают вредных температурных воздействий на смазку букс и тормозную систему, температура которых за время разогрева остается в пределах нормы.

5. После выключения установки продолжается оттаивание груза в течение нескольких часов при любой температуре наружного воздуха за счет тепла, аккумулированного грузом в процессе обогрева. Поэтому целесообразно иметь специальные отстойные пути для выдерживания вагонов перед выгрузкой в течение 2—3 ч.

На Енакиевском металлургическом заводе по проекту института Южгипрониигаз была построена и испытана установка инфракрасного излучения для одного вагона.

В качестве излучателей были использованы газовые беспламенные панельные горелки типа ГБП-120 конструкции Гипро-нефтемаша, снабженные экранирующими металлическими решетками.

Установку снабдили верхними и нижними излучателями. Верхние излучатели собраны в три панели. Две из них состоят

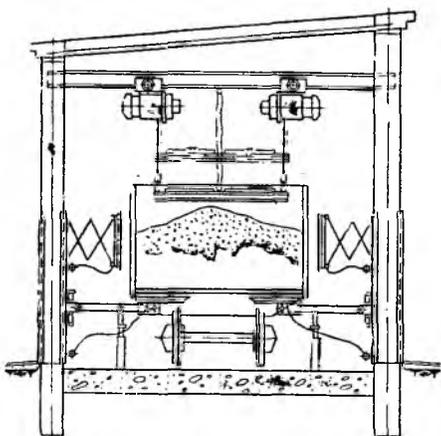


Рис. 126. Общий вид экспериментальной установки с боковыми излучателями по разогреву смерзшихся сыпучих грузов

При разогреве груза в вагоне емкостью 93 т подключалась малая панель, состоящая из четырех горелок ГБП-120. Верхние панели подвешены на тросах, во время работы они опускаются в полувагон при помощи лебедок с электроприводом.

Для предотвращения возгорания внутренних стенок деревянного полувагона на верхних панелях установлен экран из асбестовой ткани. Для нижнего обогрева полувагонов кроме горелок ГБП-120 установлены горелки типа ЮГГ-120, которые имеют расход природного

газа $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении его перед форсункой $1,9 \text{ кгс}/\text{см}^2$.

Два типа горелок были применены для сравнительных испытаний в эксплуатационных условиях с целью выбора наилучшего типа горелок при проектировании промышленных установок.

Нижние излучатели устанавливались на тележки и подводились непосредственно под люки полувагонов с зазором 300—380 мм от поверхности люка, при этом под люками, расположенными над колесными парами, устанавливались горелки ЮГГ-120, так как в зазор между ребордой колеса и крюком, фиксирующим люк в закрытом положении, горелка ГБП-120 не проходила.

Общий вид установки показан на рис. 126. Схема расположения термометров сопротивления по глубине загрузки (точки 1—7) и график изменения температур по массе концентрата изображены на рис. 127.

За период испытаний было разогрето пять полувагонов с криворожским концентратом и один полувагон с криворожской рудой. Средняя влажность концентрата составляла 10%. При ис-

пытаниях установки разогрев полувагона со смерзшейся железной рудой продолжался 2, а с концентратом — 3 ч. После выключения установки в последующие 2—3 ч происходило оттаивание среднего слоя груза в вагоне. В течение всех испытаний температура букс тормозных устройств и металлических частей вагона не поднималась выше допустимой.

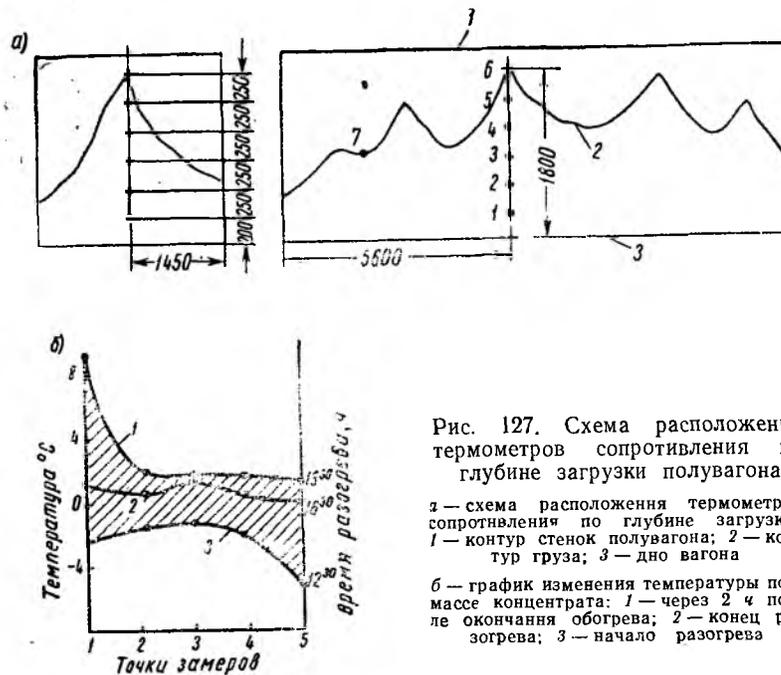


Рис. 127. Схема расположения термометров сопротивления по глубине загрузки полувагона

а — схема расположения термометров сопротивления по глубине загрузки: 1 — контур стенок полувагона; 2 — контур груза; 3 — дно вагона

б — график изменения температуры по массе концентрата: 1 — через 2 ч после окончания обогрева; 2 — конец разогрева; 3 — начало разогрева

К недостаткам установки следует отнести невысокий к. п. д. горелок ГБП-120 (радиацией передается только 30% тепла).

Горелки ЮГГ-120 при их нижнем расположении необходимо защищать от загрязнения сыпучим материалом. Для обогрева люков вагона необходимо иметь горелки с излучающей металлической поверхностью.

На одной ГРЭС была испытана опытная установка для размораживания полувагона с углем грузоподъемностью 93 т.

Для обогрева стенок и торцов вагона были применены панели с газовыми горелками инфракрасного излучения типа ПГ-1 (Краснодарского завода), работающие на природном газе с теплотой сгорания $8500 \text{ ккал}/\text{м}^3$ при давлении 155—185 мм вод. ст.; теплопроизводительность горелки 3000—3500 ккал/ч.

Всего в установке имеется 16 панелей, в каждую из которых смонтировано по 16 горелок.

Панели бокового разогрева имеют возможность перемещаться перпендикулярно от вагона, устанавливаясь на любом расстоянии от бортов вагона в пределах 300—1450 мм.

Для нагрева днища вагонов были применены блоки инфракрасных горелок БГИ конструкции института Гипроиниригаз, установленные наклонно вне габаритов вагона. На шпалах между рельсами были установлены газовые пламенные горелки со вторичными излучателями. Разгрузка вагонов осуществлялась на вагоноопрокидывателях.

Испытание опытной установки показало, что среднее время пленочного размораживания угля в полувагонах с металлическими бортами составляет 15—20 мин. При этом пленочное размораживание оказалось достаточным для разгрузки вагона на вагоноопрокидывателе.

Зарубежный опыт и данные, полученные у нас в стране, говорят о том, что восстановление сыпучести смерзшихся грузов с помощью инфракрасных лучей может быть одним из эффективнейших и экономически целесообразных способов, ускоряющих разгрузку вагонов в зимнее время.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТАХ

Исследовалась возможность отогрева инфракрасными лучами мерзлого грунта на полевом стенде, где грунт состоял из двух слоев: первый толщиной 30—35 см (растительная земля насыпного характера) влажностью 27% и второй слой на глубине 35—75 см (суглинок) влажностью 15—22%.

Верхний уровень грунтовых вод на участке находился на расстоянии 1,6 м от поверхности земли. Поверхность почвы, предусмотренной для непосредственного облучения, была покрыта травяной растительностью. Толщина снегового покрова до расчистки участка составляла 22—25 см, глубина промерзания грунта 40 см.

Грунт прогревался газовыми инфракрасными горелками с керамическими излучателями. Тепло распространялось в толще грунта и расплавляло почвенный лед.

При однослойном оттаивании горелкой с тепловой нагрузкой 6700 ккал/ч, при расстоянии между излучателем и поверхностью грунта 12 см, температуре наружного воздуха 0° С и скорости ветра 7—9 м/сек прогрев грунта на глубину промерзания (40 см) произошел через 6 ч.

При послойной передаче тепла (толщина слоя 10 см) оттаивание грунта на всю глубину промерзания произошло через 2 ч после начала работы горелки, т. е. скорость прогрева составила 17 см/ч, а площадь эффективного прогрева грунта 0,87 м². Объем отогретого грунта за этот период составил 0,35 м³, т. е. в 1 ч оттаивало 0,175 м³ мерзлого грунта.

При производительности горелки 0,29 м³/ч для отогрева 1 м³ мерзлого грунта расход сжиженного пропана равнялся 1,65 м³.

Установлено, что инфракрасные газовые излучатели, применяемые для оттаивания мерзлого грунта, позволяют сократить сроки выполнения подготовительных земляных работ в 4—6 раз по сравнению с другими видами оттаивания.

На рис. 128 показано изменение температуры грунта при однослойном оттаивании.

1. При температуре огневой поверхности керамической насадки 900° С температура поверхностного грунта в установившемся тепловом состоянии составила 460° С.

2. Температура грунта на глубине 0,25 м достигла 25° С, а на глубине 0,5 м — 3,5° С. Таким образом, грунт на всей глубине промерзания оттаял.

3. Оттаивание грунта произошло в горизонтальных плоскостях каждого слоя в стороны от периметра рефлектора горелки на 0,25 м; при этом эффективная площадь прогрева составила 1 м² (однослойное оттаивание).

4. Объем оттаявшего грунта при средней тепловой нагрузке горелки 6700 ккал/ч и при расстоянии между огневой поверхностью насадка и поверхностью грунта 120 мм составил 0,34 м³.

5. Скорость прогрева составила 5,66 см/ч.

Представленный на рис. 129 график выражает зависимость глубины оттаивания слоя грунта от длительности нагрева при послойном и однослойном оттаивании. Из рассмотрения этого графика видно, что при однослойном способе оттаивания грунт полностью растаял через 6 ч прогрева, а при послойном способе — через 2 ч; скорость прогрева грунта при указанной продолжительности полного отогрева послойного оттаивания составила 17 см/ч, т. е. в 3 раза быстрее, чем при однослойном оттаивании.

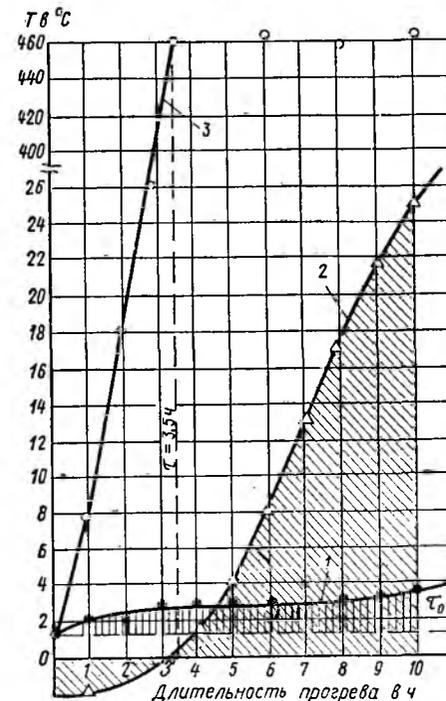


Рис. 128. Зависимость изменения температуры грунта по времени при однослойном оттаивании

1 — температура на поверхности грунта; 2 — то же, на глубине 0,25 м; 3 — то же на глубине 0,5 м.

Основные результаты определения теплового баланса горелки

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Режимы	
			1	2
Тепловая нагрузка горелки	Q	ккал/ч	7700	6370
Расход газа	$\zeta_{г}$	м ³ /ч	0,35	0,29
Теплота сгорания сжиженного газа	$Q_{н}$	ккал/м ³	22 000	22 000
Теоретически необходимое для горения количество воздуха	$V_{о}$	м ³ /м ³	23,5	23,5
Объем сухих продуктов сгорания	$V_{с.г}$	»	38,3	40,3
Объем водяных паров в продуктах сгорания	V_{H_2O}	»	4,07	4,12
Избыток воздуха под рефлектором горелки	$\alpha_{ух}$	—	1,29	1,3
Температура уходящих газов	$t_{ух}$	°С	460	420
Потери тепла с уходящими газами	$q_{г}$	ккал/м ³	6570	6090
		»	2300	1760
То же	»	%	29,8	27,5
Потери тепла в окружающую среду	$q_{б}$	ккал/ч	790	750
		%	10,2	11,7
Температура корпуса горелки	$t_{г}$	°С	179	170
Температура наружного воздуха	$t_{в}$	°С	5,4	5,4
Полезноиспользуемое тепло	$q_{п}$	ккал/ч	4610	3880
Коэффициент полезного действия	η	%	60	60,8

При стоимости 1 кг сжиженного газа 12 коп. финансовые затраты на расход топлива для отогрева 1 м³ грунта составят примерно 40 коп.

При двух режимах работы (тепловая нагрузка горелки 6370—7700 ккал/ч) потеря тепла с уходящими газами составила 27,5—29,8%, а потери тепла в окружающую среду от нагретого корпуса горелки составили 11,7—10,2%; к. п. д. горелки достигал 60%.

Уменьшение к. п. д. горелки при большей тепловой нагрузке объясняется увеличением потерь тепла с уходящими газами за счет повышения их температуры на 40°С. Результаты определения теплового баланса горелки инфракрасного излучения при отогреве мерзлого грунта приведены в табл. 34.

На рис. 130 представлен график Научно-исследовательского института по организации и механизации строительства (НИИОМе), характеризующий зависимость количества тепла, необходимого для отогрева 1 м³ мерзлого грунта от средней зимней температуры наружного воздуха при применении различных способов оттаивания.

На график нанесены точки, полученные при отогреве грунта газовой горелкой инфракрасного излучения, соответствующие средней температуре наружного воздуха за зимний период.

В табл. 35 приведены технико-экономические показатели подготовки мерзлых грунтов различными методами оттаивания. При сравнительной оценке продолжительности оттаивания 1 м³ мерзлого грунта из данных в табл. 35 видно, что метод отогрева грунта с помощью газогорелочных устройств инфракрасного излучения позволяет в 4—6 раз сократить сроки подготовительных работ.

Недостатком метода оттаивания грунтов газогорелочными устройствами инфракрасного излучения является небольшая толщина слоя оттаивания, равная 10 см. Однако эту величину следует рассматривать как частный случай, характерный для приведенного опыта. Можно применить послойное оттаивание грунта газовыми излучателями с толщиной слоя 20—30 см, но

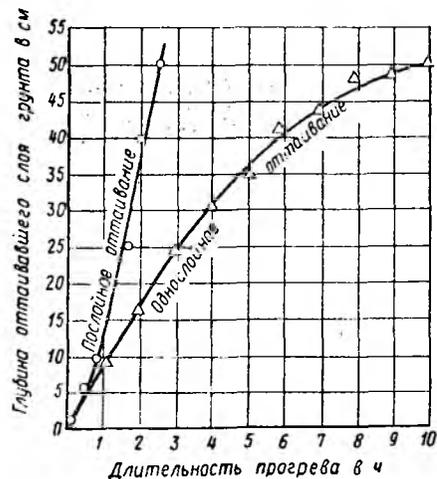


Рис. 129. Зависимость глубины оттаивания слоя грунта от длительности нагрева при однослойном и послойном оттаивании

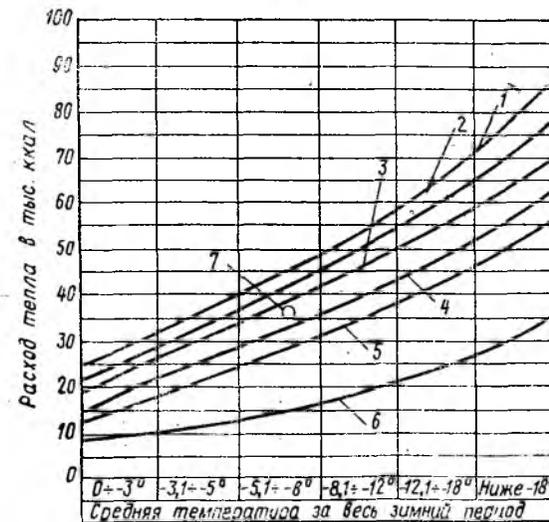


Рис. 130. Количество тепла, необходимое при оттаивании 1 м³ мерзлого грунта, в зависимости от средней температуры наружного воздуха при различных способах оттаивания

1 — местными тепляками; 2 — горизонтальными электродами; 3 — вертикальными электродами; 4 — циркуляционными иглами; 5 — электронглами; 6 — глубинными электродами; 7 — горелкой инфракрасного излучения

Технические показатели различных методов оттаивания мерзлого грунта

Способ оттаивания	Направление распространения тепла	Толщина слоя оттаивания в м	Расход тепла или энергии для оттаивания 1 м ³ грунта	Продолжительность оттаивания 1 м ³ грунта в ч	Расстояние между теплоносителями в м	Глубина шурфов в м
Кострами под металлическим кожухом	Вертикальное	0,2—0,5	—	24	—	—
Паровыми регистрами (поверхностное)	»	До 1	50—100 кг	48	По размеру площади	—
Паровыми иглами	Радиальное	На глубину промерзания	50—100 »	46	1—1,2	1—1,2
Водяными циркуляционными иглами	»	То же	1200 ккал	48	1,5	1
Электроотражательными печами	»	До 1	До 45 квт/ч	24—48	—	—
Электротепляками	Вертикальное	» 0,7	35—45 квт	36—48	—	—
Факельными горелками под кожухами	»	1	—	24	1 газовая горелка на кожух	—
Газогорелочными устройствами инфракрасного излучения:						
а) при оттаивании однослойном	»	0,84—0,4	118 000 ккал	17,7	0,6	—
б) » » многослойном	»	0,1	36300 »	5,7	0,6	—

Продолжение

Способ оттаивания	Направление распространения тепла	Толщина слоя оттаивания в м	Расход тепла или энергии для оттаивания 1 м ³ грунта	Продолжительность оттаивания 1 м ³ грунта в ч	Расстояние между теплоносителями в м	Глубина шурфов в м
Горизонтальными струнными электродами	Вертикальное	До 0,8	60 квт·ч	20—35	0,4 при 220 в 0,7 » 380 в	—
Вертикальными поверхностными электродами	Радиальное	До 0,8	30—95 »	49	0,4—0,8 при 220 в	0,8
Вертикальными глубинными электродами	Вертикальное	На глубину промерзания	20—22 »	7—13	0,5—0,7 при 380 в	Ниже глубины промерзания на 10 см
Токами высокой частоты	»	То же	10—32 »	0,5—1	—	—
» высокого напряжения	»	»	30—80 »	96	3,7	2—3
Электродными	Радиальное	»	30—40 »	24	1,0—1,5	0,8—1
Электродными теплового действия (ТЭ)	»	1,5	—	24	0,5—0,8	1—2
Электродными жидкостными (Т-1)	»	На глубину промерзания	—	24	0,5—0,8	—

Технико-экономические показатели различных способов отогрева мерзлого грунта

Наименование	Размерность	Величина	
		проектная	экспериментальная
К. п. д. установки η	%	50	60,4
Температура огневой поверхности $t_{и}$	$^{\circ}\text{C}$	850—950	900
Удельная тепловая нагрузка горелки $q_{изл}$	ккал/см ² ч	8	11,8
Удельные теплопоглощения грунта $q_{погл}$	»	0,348—0,465	0,399
Расстояние между огневой поверхностью излучателя и поверхностью грунта H	см	20—25	12—15
Ширина траншеи обогреваемого грунта B	м	0,8—0,85	0,9—0,93
Расход тепла на отогрев мерзлого грунта при послойном оттаивании $Q_{подв}$	ккал/м ³	30 000	36 300
Толщина слоя при послойном оттаивании h	см	30—40	10
Продолжительность оттаивания 1 м ³ мерзлого грунта при послойном оттаивании $\tau_{по л}$	ч	10	6
Производительность газового агрегата (20 горелок) при указанных условиях $Q_{агр}$	м ³ /ч	4,2	2,8

при этом скорость оттаивания будет меньше, чем в первом случае (на графике рис. 130 кривые скорости оттаивания займут промежуточное положение между кривыми 1 и 2). Выбрать оптимальную величину толщины слоя при послойном оттаивании с учетом затраты времени и средств на удаление грунта из траншеи можно лишь после опытной проверки промышленного агрегата при рытье траншеи в зимних условиях комплексной бригадой рабочих.

Для более правильной оценки эффективности отогрева мерзлого грунта газовыми горелками инфракрасного излучения при послойном оттаивании следует исходить из следующих положений:

1) рассматриваемый способ применяется на аварийных работах — в этом случае экономические затраты на производство земляных работ могут не учитываться, ибо материальные убытки от возникшей аварии в большинстве случаев во много раз больше, чем стоимость ремонтно-аварийных работ, поэтому рассматриваемый способ отогрева грунта является достаточно эффективным средством при выполнении земляных работ в зимних условиях;

2) предлагаемый способ применяется при строительномонтажных работах — в этом случае преобладающим требованием является снижение себестоимости производства земляных работ, которое также может быть выполнено при следующей организации ведения работ: комплексной бригаде с тремя-четырьмя землекопами придаются два передвижных газовых агрегата для отогрева мерзлого грунта, оборудованных двадцатью излучателями, осуществляющих прогрев участка на длине 15—16 м; один водитель устанавливает последовательно оба агрегата, охватывая два участка траншеи общей длиной 30—32 м, второй агрегат устанавливается через 30 мин с момента установки первого (30 мин — время, необходимое для подъезда агрегата к траншее, установки горелок и включения их в работу); через 30 мин прогрева 1-го участка бригада землекопов приступает к рытью траншеи, а первый агрегат переводится на III участок, и после включения горелок (через 1 ч от начального времени) начинается прогрев участка III. Через последующие 30 мин землекопы переходят на II участок, а второй агрегат переводится на I участок. Так, выполняя прогрев траншеи по участкам, можно обеспечить непрерывное рытье траншеи с учетом занятости отдельных рабочих на укреплении стен траншеи и других вспомогательных операциях.

В табл. 36 дается сопоставление основных технико-экономических показателей способа отогрева мерзлого грунта с помощью газовых горелок инфракрасного излучения, принятых в проекте и полученных после экспериментальной проверки на полевом стенде.

ГЛАВА V

ПРИМЕНЕНИЕ ГОРЕЛОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОТОПЛЕНИЯ И ОБОГРЕВА ЗАКРЫТЫХ И ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДОК

1. ОСОБЕННОСТИ ОТОПЛЕНИЯ ГОРЕЛКАМИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ НИХ ТРЕБОВАНИЯ

За последнее десятилетие значительное распространение получили системы лучистого отопления с использованием газовых горелок инфракрасного излучения. В Советском Союзе все шире находят применение газовые горелки инфракрасного излучения (ГИИ) для отопления зданий легкого типа и больших объемов, а также открытых площадок (кафе, закусочные и производственные цехи).

Суть лучистого отопления состоит в том, что излучение в области инфракрасного спектра, попадая на тело человека, поглощается им и, преобразуясь в тепловую энергию, нагревает его.

При этом окружающий воздух почти не нагревается.

Для лучшего понимания действия лучистого отопления на организм человека необходимо ознакомиться с особенностями тепловых ощущений человека и био-физиологических восприятий им инфракрасного излучения.

Известно, что в результате жизнедеятельности человек непрерывно вырабатывает тепловую энергию, часть которой (около 20%) используется на полезную работу организма, а другая часть, около 80%, удаляется в окружающую среду.

Считается, что взрослый человек в спокойном состоянии вырабатывает в 1 ч 108—125 ккал тепла. При усиленной физической работе тепловыделения человека возрастают свыше 450 ккал/ч.

Отдача человеком тепла в окружающую среду при нормальных условиях и конвективном отоплении составляет: 25% (конвекцией); 50% (излучением); 22% (испарением) и 3% (дыханием и движением).

Таким образом, теплотери лучеиспусканием в этом случае составляют половину всех теплотери человека и в 2 раза превышают теплотери конвекцией.

До недавнего времени считалось, что тепловые ощущения человека зависят только от так называемого теплового баланса его тела, т. е. от того, сколько тепла человеческое тело отдает в окружающую среду. При этом не принималось во внимание, каким образом отдается это тепло и каково соотношение температур воздуха и ограждающих конструкций или предметов, непосредственно окружающих человека.

Поскольку основным видом отопления до недавнего времени было конвективное, то и проводившиеся исследования по определению комфортных условий для человека подтверждали, что нормальное тепловое ощущение человек испытывает при некотором интервале температур окружающего воздуха. Например, для человека, не выполняющего физическую работу, таким интервалом температур окружающего воздуха принято считать 18—22°.

При снижении или повышении этих температурных пределов человек испытывает неприятные тепловые ощущения (в первом случае он зябнет, во втором — ему жарко).

В соответствии с этими условиями и были установлены нормы оптимальной температуры воздуха внутри жилых и общественных помещений.

С применением лучистого отопления возникло немало трудностей в обеспечении комфортных условий для людей, находящихся в помещениях, обогреваемых этим отоплением. Наблюдались случаи, когда, казалось бы, при одинаковых условиях обогрева помещений лучистым отоплением одни люди жаловались на холод, другие — на жару. Многочисленные исследования показали, что для человека не безразлично, каким способом ему

передается или отводится от него тепло. Так, например, оказалось, что при лучистом обогреве общие теплотери человека несколько снижаются в сравнении с теплотериями при конвективном отоплении. Вместе с тем при изменении способа обогрева изменяется и доля теплотери лучеиспусканием и конвекцией (табл. 37).

Таблица 37

Доля теплотери человеком в зависимости от способа отопления		
Теплотери в ккал/ч	При лучистом отоплении	При конвективном отоплении
Излучением	40	54
Конвекцией	53	40
Испарением	19	10
Итого	112	114

Из приведенных данных видно, что при лучистом отоплении наибольшая часть теплотери осуществляется конвекцией, а при конвективном, наоборот, излучением. Таким образом, при лучистом отоплении тепловые ощущения человека будут более благоприятными, чем при конвективном.

Исследованиями было установлено, что для достижения комфорта при лучистом или конвективном отоплении необходимо обеспечить определенное соотношение температур внутреннего воздуха и ограждающих конструкций помещения (рис. 131).

Из рисунка видно, что при лучистом отоплении допустимая разница между температурой внутреннего воздуха и ограждающих конструкций может быть значительно большей, чем при конвективном. Это значит, что при лучистом отоплении комфортные условия могут быть обеспечены при более низких температурах внутреннего воздуха, чем при конвективном отоплении при тех же температурах ограждающих конструкций.

Исследования многих гигиенистов и сантехников показывают, что работоспособность человека значительно выше при вдыхании

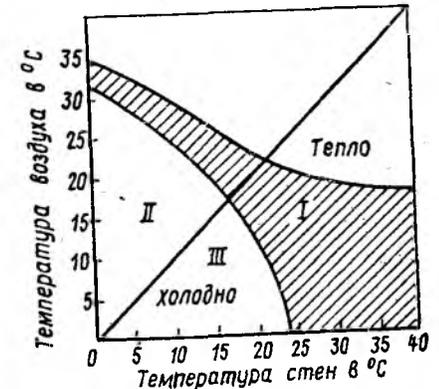


Рис. 131. Области рационального применения лучистых и конвективных систем отопления

I — комфортного состояния; II — конвективного отопления; III — лучистого отопления

хании им воздуха с более (относительно) низкой температурой при одинаковых тепловых ощущениях. Так, например, Берфорд, Крепко и Джилквин пришли к выводу, что при нормальных комнатных условиях целесообразно, чтобы человек дышал воздухом с температурой лишь несколько выше 10°C , ибо это облегчает экзотермические реакции.

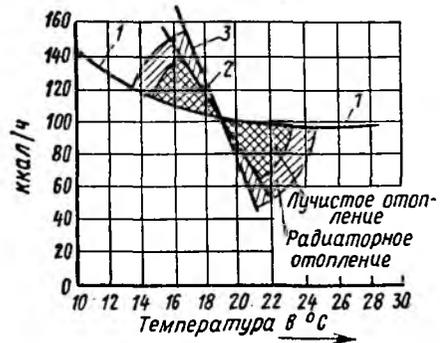


Рис. 132. Потери тепла телом человека в комфортных условиях

1 — полные потери в зависимости от температуры окружающей; 2 — потерь при лучистом отоплении; 3 — потерь при конвективном отоплении

При длительном вдыхании горячего воздуха повышалась в 2—5 раз активность угольной ангидразы.

Исследования, проведенные институтом Мосгазпроект, также показали, что при обогреве помещений горелками инфракрасного излучения наилучшее самочувствие людей бывает при температуре воздуха $13-13,5^{\circ}\text{C}$, т. е. ниже общепринятой $18-19^{\circ}\text{C}$.

Весьма существенным фактором в теплоощущениях человека является уровень его физической деятельности. Тепловыделения с увеличением физической нагрузки могут повыситься с 100 до 450 ккал/ч и более. Эти избытки тепловыделений должны быть погашены за счет передачи их окружающей среде: путем конвекции окружающему воздуху и лучеиспусканием на ограждающие конструкции или окружающие предметы. Наилучшим в этом случае является преобладание теплопотерь за счет конвекции.

При лучистом отоплении как раз доля теплопотерь конвекцией и увеличивается. Это достигается, по-видимому, как за счет повышения температуры кожи, так и за счет увеличения скорости движения воздуха в непосредственной близости от тела человека.

Лучистое отопление требует от терморегулирующего аппарата человека меньших усилий для приспособляемости.

На рис. 132 кривой 1 представлены общие теплопотери нормально одетым человеком (включая и испарение) в зависимо-

сти от температуры окружающей среды в условиях самоприспособляемости; кривой 2 — потери тепла человека при лучистом отоплении, а кривой 3 — те же потери, но при конвективном отоплении. Из рисунка видно, что кривая 2 ближе к кривой 1, т. е. условия теплопотерь при лучистом отоплении более легкие (ближе к автотерморегуляции), чем при конвективном.

На рис. 133 показано распределение между излучением и конвекцией тепла, теряемого человеком при его поверхностной температуре $24,5^{\circ}\text{C}$

Проведенные И. М. Эрманом опыты показали, что при вдыхании горячего ($50-60^{\circ}\text{C}$) воздуха в условиях нахождения человека в помещении с внутренней температурой 18°C происходит повышение температуры кожи лба, груди и спины и понижение ее на конечностях.

При длительном вдыхании горячего воздуха повышалась в 2—5 раз активность угольной ангидразы.

Исследования, проведенные институтом Мосгазпроект, также показали, что при обогреве помещений горелками инфракрасного излучения наилучшее самочувствие людей бывает при температуре воздуха $13-13,5^{\circ}\text{C}$, т. е. ниже общепринятой $18-19^{\circ}\text{C}$.

Весьма существенным фактором в теплоощущениях человека является уровень его физической деятельности. Тепловыделения с увеличением физической нагрузки могут повыситься с 100 до 450 ккал/ч и более. Эти избытки тепловыделений должны быть погашены за счет передачи их окружающей среде: путем конвекции окружающему воздуху и лучеиспусканием на ограждающие конструкции или окружающие предметы. Наилучшим в этом случае является преобладание теплопотерь за счет конвекции.

При лучистом отоплении как раз доля теплопотерь конвекцией и увеличивается. Это достигается, по-видимому, как за счет повышения температуры кожи, так и за счет увеличения скорости движения воздуха в непосредственной близости от тела человека.

Лучистое отопление требует от терморегулирующего аппарата человека меньших усилий для приспособляемости.

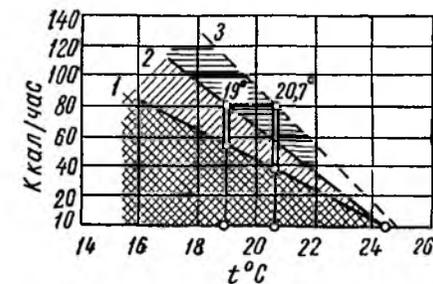
На рис. 132 кривой 1 представлены общие теплопотери нормально одетым человеком (включая и испарение) в зависимо-

сти от температуры окружающей среды в условиях самоприспособляемости; кривой 2 — потери тепла человека при лучистом отоплении, а кривой 3 — те же потери, но при конвективном отоплении. Из рисунка видно, что кривая 2 ближе к кривой 1, т. е. условия теплопотерь при лучистом отоплении более легкие (ближе к автотерморегуляции), чем при конвективном.

На рис. 133 показано распределение между излучением и конвекцией тепла, теряемого человеком при его поверхностной

Рис. 133. Распределение полного тепла между излучением и конвекцией, теряемого телом человека при его поверхностной температуре $24,5^{\circ}\text{C}$

1 — потеря тепла конвекцией; 2 — суммарная потеря тепла конвекцией и излучением при лучистом отоплении; 3 — то же, при конвективном отоплении



температуре (одежды) $24,5^{\circ}\text{C}$ в условиях разных температур окружающей среды.

Из рисунка видно, что если человек теряет 80 ккал/ч, то для комфортных условий его существования при лучистом отоплении необходимо поддерживать температуру внутреннего воздуха 19°C , а при конвективном — $20,7^{\circ}\text{C}$. Из этого следует, что в данном случае будет уменьшена потеря тепла телом человека за счет конвекции, что с точки зрения физиологии считается ненормальным явлением.

При обычной температуре помещений $15-20^{\circ}\text{C}$ можно считать, что теплопотери влаговыведением не имеют большого значения, так как они составляют незначительную величину (около 20 ккал/ч) и при этой температуре остаются почти постоянными. Леконт даже считает, что влаговыведение имеет значение лишь после достижения окружающей средой температуры в 30° , поскольку резкое возрастание влаговыведения наступает только после этой температуры.

Следующим фактором, влияющим на комфортные условия человека, является постоянство температуры окружающего воздуха по высоте помещения. По существующим нормам максимально допустимая разница в температурах воздуха по высоте помещения (от пола до потолка) не должна превышать $3,5^{\circ}$.

Как показывают исследования, лучистое отопление по сравнению с конвективным дает более равномерную температуру по высоте помещения. На рис. 134 показаны кривые колебания температур воздуха по высоте одного и того же помещения при лучистом и конвективном отоплении. Из рисунка видно, что при конвективном отоплении, во-первых, температура пола и потол-

ка ниже температуры внутреннего воздуха вблизи них; во-вторых, разность температур воздуха у пола и потолка значительно больше ($\sim 2^\circ$), чем при лучистом отоплении ($\sim 1^\circ$). Это создает более сильные токи воздуха при конвективном отоплении, особенно вблизи радиаторов, чем при лучистом. Поскольку при конвективном отоплении требуется поддерживать более высокую температуру внутреннего воздуха, чем при лучистом, то создаются неприятные токи воздухом вблизи окон и дверей. На рис. 134 показаны колебания температуры воздуха при лучистом и конвективном отоплении в зависимости от расстояния точек замера до окна. Из рисунка видно, что при конвективном отоплении температура воздуха понижается с удалением от окна на расстоянии до 50 см. Разность температуры на этом расстоянии достигает 4°C . Замеры производились при одинарном остеклении и наружной температуре 2°C .

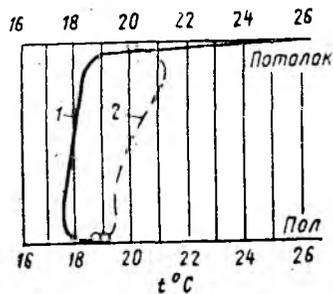


Рис. 134. Колебание температуры воздуха по высоте помещения при лучистом и конвективном отоплении

1 — лучистое потолочное отопление; 2 — конвективное (радиаторное) отопление

Было установлено, что поверхностная температура окон при лучистом отоплении на $3,5^\circ\text{C}$ ниже, чем при конвективном.

Из всех факторов, влияющих на комфортные условия, при лучистом отоплении все же наиболее важным следует считать плотность (дозу) облучения человека и спектральный состав этого облучения.

К сожалению, имеющиеся в этом вопросе исследования еще не дают полной и ясной картины воздействия на человека инфракрасного излучения в особенности излучателями, занимающими среднее положение между «темными» (до $700\text{—}750^\circ\text{C}$) и «светлыми» (свыше 2500°C), к которым относятся газовые горелки инфракрасного излучения. В опубликованных же данных различных исследований и авторов нередко имеется ряд противоречий и неясностей. Иногда закономерности, относящиеся к световому или близкому

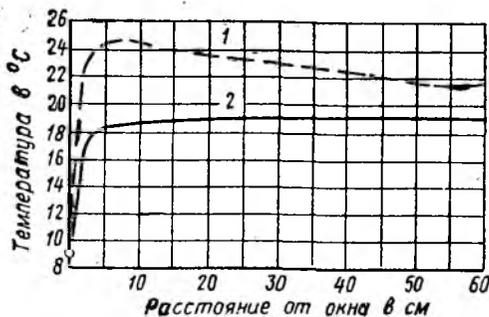


Рис. 135. Колебание температуры воздуха в зависимости от расстояния до окна

1 — конвективное отопление; 2 — лучистое отопление

к нему коротковолновому инфракрасному излучению, механически распространяют на длинноволновое излучение, чем вносят путаницу в вопросы использования инфракрасного излучения для тех или иных целей, и в частности, для отопления. Здесь мы не претендуем на всеобъемлющее рассмотрение указанных вопросов и дачу исчерпывающих рекомендаций, а лишь попытаемся рассмотреть некоторые из них.

Строительные нормы и правила Госстроя СССР (СНиП II-Г.7-62) устанавливают минимальную дозу облучения людей на рабочих местах до $150\text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$ ($0,25\text{ ккал/см}^2 \cdot \text{мин}$) без проведения каких-либо дополнительных мероприятий по обеспечению комфорта.

Проф. Г. Х. Шахбазян установил, что при температуре воздуха 10°C тепловое самочувствие человека будет нормальным, если облучать одну треть его поверхности лучистым теплом в $0,5\text{ ккал/см}^2 \cdot \text{мин}$. Получение человеком дополнительного тепла извне в виде лучистой энергии около 3 ккал/мин дает примерно тот же эффект, что и увеличение тепловыделений самим человеком с $1,5$ (покой) до $4,3\text{ ккал/мин}$ (средняя работа).

М. С. Горомосов и Н. А. Ципер, исследуя гигиенические свойства панельного отопления в жилых зданиях, указывают на максимально допустимую дозу облучения в $1\text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$ при температуре окружающего воздуха $18\text{—}20^\circ\text{C}$.

Здесь необходимо отметить, что хотя по приводимому этими авторами графику излучения панели в зависимости от расстояния между ней и человеком (рис. 136) при расстоянии меньше $1,5\text{ м}$ от панели на человека падает более $4\text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$ лучистой энергии (при температуре поверхности панели 45°C), тем не менее авторы рекомендуют применение панелей с температурой поверхности до 45°C , т. е. допускают дозу облучения, более чем в 4 раза превышающую первоначально ими указанную.

Некоторые авторы и нормативные источники устанавливают дозу облучения на единицу площади пола отапливаемого помещения.

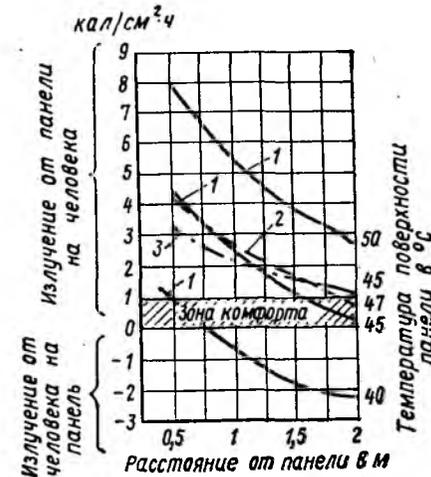


Рис. 136. Излучение от отопительной панели и человека в зависимости от расстояния между панелью и человеком (при температурах панели $40\text{—}50^\circ\text{C}$ и температуре одежды человека 27°C)

1 — по расчету; 2 — по натурному опыту № 1; 3 — по натурному опыту № 2

Анализ этих данных показывает, что в рекомендуемых величинах доз облучения, даже для одних и тех же помещений, имеются большие расхождения (в 5—30 раз), причем в подавляющем большинстве эти дозы облучения по-существу не обосновываются никакими соображениями.

Авторы настоящей книги совместно с лабораторией использования газа института ВНИИГАЗ и органами санитарного надзора провели исследования и испытания систем лучистого отопления с горелками инфракрасного излучения в зданиях общественного питания (кафе, закусочные и т. п.) легкого типа и установили, что при облучении в 40—50 ккал/м²·ч посетители и обслуживающий персонал кафе (закусочных) чувствовали себя наилучшим образом. Исходя из этого мы рекомендуем при температуре внутреннего воздуха 13—15°С и ограждающих конструкций (остекление) 5—9°С в подобных помещениях устанавливать дозу облучения на уровне 1,6—1,7 м от пола (уровень стоящего человека) в пределах 40—50 ккал/м²·ч.

Конечно, эти дозы облучения не могут считаться неизменными и тем более не могут быть механически распространены на другие теплотехнические условия помещений и физиологические условия существования людей. Нужно помнить, что тело человека, как и любое физическое тело, подчиняется законам физики и, в частности, закону теплопередачи. Если человека окружают конструкции или предметы, имеющие температуру выше температуры одежды человека, человек воспринимает от них излучение и, следовательно, нагревается. В случаях же, когда температура окружающих конструкций (предметов) ниже температуры одежды человека, он сам излучает энергию на эти конструкции (предметы), т. е. теряет тепло.

Летавет сообщает, что при расположении вблизи человека экрана с температурой 5°С, несмотря на заполнение промежутка между экраном и человеком теплым воздухом, исключающим конвективную теплопотерю человеком, происходило понижение температуры кожи на 4°, а подкожной ткани — на 2,5°.

По данным Шахбазяна, доза облучения в 0,5 ккал/см²·мин для лиц, не выполняющих тяжелую физическую работу, позволяет снизить зону комфорта на 5—6°С, а в 1 ккал/см²·мин — на 6—8°С.

Таблица 38

Восприятие инфракрасных лучей кожей человека

Облученность в ккал/см ² ·мин	Ощущение
0,0015	Ощущение боли Горячо, жжет, напряжение лица Ощущение тепла После некоторого действия легкое ощущение тепла
0,0002	
0,00005	
0,000015	

3. Дене приводит следующие данные о восприятии инфракрасных лучей кожей человека (табл. 38).

Таким образом, величина дозы облучения имеет весьма важное значение в обеспечении комфорта человека. В одних случаях облучение будет полезным, в других (при превышении дозы) — вредным и даже опасным, так как может вызвать перегрев организма (тепловой удар).

Как установлено исследованиями гигиенистов, в вопросе комфорта при инфракрасном облучении немаловажную роль имеют скорость движения и влажность воздуха, который окружает человек.

Так, например, если в относительно неподвижном воздухе комфортные условия находятся в интервале температур 16—24°С, то при движении воздуха этот интервал может быть расширен до 16—33°С.

Картман установил следующую зависимость между облученностью (дозой облучения), температурой окружающего воздуха и скоростью его движения (табл. 39).

Таблица 39

Зависимость между дозой облучения, температурой окружающего воздуха и скоростью его движения

Облученность (доза) в ккал/см ² ·мин	Температура движущегося воздуха в °С	Скорость движения воздуха в м/сек
0,5—1	23	0,5
1,0—1,5	22	1,5
1,5—2	20	1,5
2,0—2,5	20	2
2,5—3	18	1,5
3,0—3,5	18	2
3,5—4	16	2

Одновременно с этим было выявлено, что ухудшение теплоощущений и повышение влажности воздуха под одеждой наблюдалось при температуре окружающего воздуха 22°С и относительной влажности 75%, а также при температуре 30°С и относительной влажности 65% (скорость движения воздуха 1—2 м/сек). Наиболее приемлемой в этих случаях оказалась влажность 40—50%.

Помимо количественной характеристики облучения человека при лучистом отоплении существенное значение имеет и качественная (спектральная) характеристика этого облучения.

Многими исследователями установлено, что кожа человека в некоторой части инфракрасной области спектра весьма приближается по излучению, а следовательно, и по поглощению к черному телу при той же температуре.

На рис. 137 показана отражательная способность человеческой кожи. Как видно из рисунка, максимальная отражательная способность кожи лежит в области коротковолновых (видимых) лучей, т. е. в области красных лучей, где находится максимум солнечного излучения.

Таким образом, сама природа защищает человека от вредного влияния солнечного излучения. В области инфракрасного излучения, особенно в средней и длинноволновой его части, отражательная способность кожи минимальна и находится в пределах 5—4%.

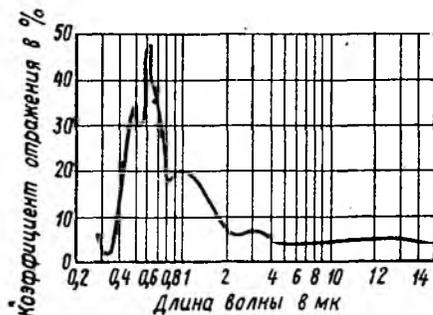


Рис. 137. Отражательная способность человеческой кожи

Для лучшего уяснения вопроса воздействия инфракрасного излучения на кожу человека и возникающих в связи с этим реакций отметим, что в элементарном представлении кожа состоит из эпидермиса (верхний покров), состоящего из отмерших и живых клеток, кориума (соединительная часть кожи) и подкожной жировой ткани. Эпидермис и кориум составляют общую толщину приблизительно 1—1,4 мм, а подкожная ткань — до 3 мм и более в зависимости от упитанности и участка тела. К зародышевому слою эпидермиса подходят сосуды, подводящие питательные вещества и некоторые нервные окончания, а также безмякотные волокна, тесно связанные с эпителиальными клетками. Малейшее повреждение этих клеток приводит к нервному раздражению, вызывающему боль. В общем упрощенном виде можно сказать, что кожа с помощью нервной системы, связанной с ней и вызывающей ощущения тепла, может включить в действие все средства терморегулирования организма. При соответствующем сигнале поры кожи сужаются или расширяются, потовые железы начинают действовать и прежде всего начинается более интенсивное движение крови в тех тканях, в которых температура становится выше нормы. Циркулирующая кровь отнимает тепло от тканей и тем восстанавливает нормальную температуру, а следовательно, и необходимую жизнедеятельность организма.

На рис. 138 показана прозрачность кожи и тканей тела человека в зависимости от длины волны облучения. Из рисунка ясно, что, во-первых, прозрачность зависит от толщины кожи (ткани); во-вторых, максимум прозрачности лежит в коротковолновой (световой) и граничащей с ней области; в-третьих, для лучей с длиной волны более 2 мкм кожа практически уже непрозрачна.

По данным М. Дерибере, инфракрасные лучи с длиной волны от 0,76 до 1,5 мкм проникают в глубь ткани; от 1,5 до 5 мкм поглощаются эпидермисом и соединительно-тканевым слоем кожи, а лучи длиной волны более 5 мкм поглощаются роговым слоем.

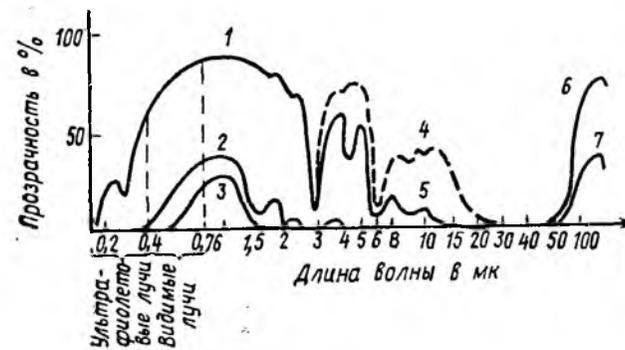


Рис. 138. Прозрачность кожи и тканей человека

1 — эпидермис; 2 — кожа; 3 — ткань щеки; 4 — сухой эпидермис; 5 — влажный эпидермис; 6 — эпидермис; 7 — кожа

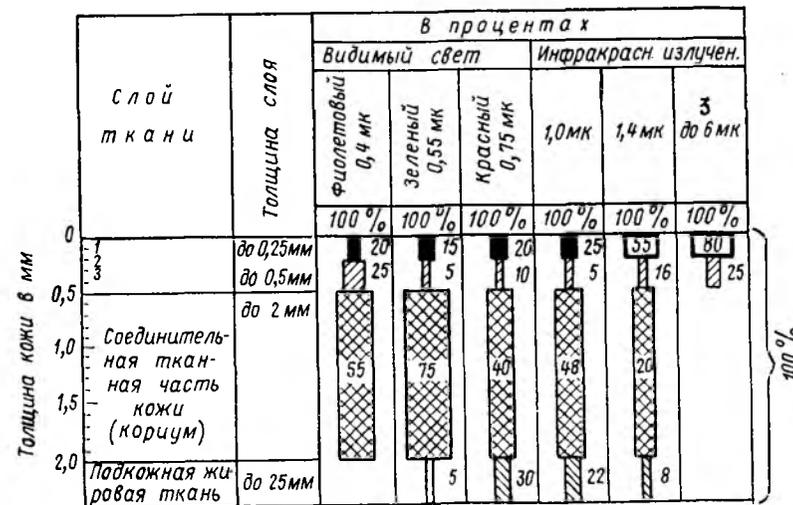


Рис. 139. Поглощение световых и инфракрасных лучей в коже человека

По данным Бахема и Бомана (рис. 139), 56% инфракрасного излучения с длиной волны в 1,4 мкм очень легко поглощается верхним слоем (эпидермисом) кожи. Как видим, между первыми и вторыми данными имеются значительные противоречия.

Как видно из рис. 140 (кривая 1), прозрачность эпидермиса при излучении примерно до 2,2 мк почти лежит на уровне максимума (70—72%).

Нагрев кожи происходит неравномерно и зависит от длины волны облучения (см. рис. 140). Излучение с более короткими волнами проникает на большую глубину, но нагревает ткань меньше, чем излучение той же интенсивности, но с более длинной волной. К тому же длинноволновое излучение поглощаясь

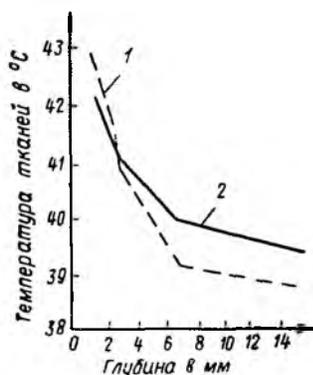


Рис. 140. Действие облучения продолжительностью 6 мин на ткани человека

1 — 1,74 кал/мин, $\lambda < 3$ мк;
2 — 1,79 кал/мин, $\lambda > 3$ мк

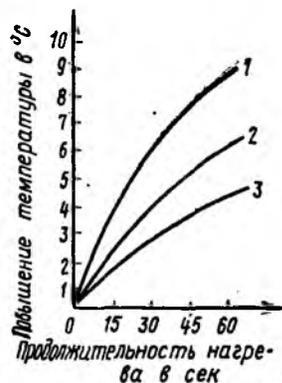


Рис. 141. Повышение температуры кожи под влиянием излучения одной и той же интенсивности

1 — дальние инфракрасные волны; 2 — ближние инфракрасные волны; 3 — видимые волны

поверхностным слоем кожи нагревает ее значительно сильнее, чем коротковолновое излучение.

На рис. 141 показано повышение температуры кожи человека под действием облучения одной и той же интенсивности, но с различной длиной волны. Здесь также хорошо видно более сильное тепловое воздействие на кожу длинноволнового излучения по сравнению с коротковолновым. Этим хорошо объясняется то, что человек легче переносит одну и ту же дозу облучения от солнца, чем от тел, нагретых до температуры ниже 1200°С.

В ясный летний день (в полдень) на 40° северной широты полная энергия солнечного излучения составляет примерно 920 ккал/м²·ч, из которой около 52,4% приходится на инфракрасные излучения, т. е. 481 ккал/м²·ч. Однако, учитывая, что значительную часть этой энергии (более 2/3) составляет коротковолновое излучение ($\lambda = 1,7 \div 1,1$ мк), которое сравнительно еще хорошо отражается кожей человека, а поглощается более глубокими тканями, не нагревая их сильно, то: во-первых, доза облучения значительно сократится; во-вторых, кожа сильно не

перегреется и, следовательно, человек не ощутит чрезмерного нагрева, как это было бы при облучении его той же дозой лучистой энергии, но от нагретого предмета с температурой несколько ниже 1200°С. Здесь следует учитывать еще и положительное влияние потоков наружного воздуха (ветра), которое имеется на улице в солнечный день.

Конечно, этот пример мы привели лишь для сравнения, ибо для жителя более северных широт такое облучение может быть и невыносимым. Проф. Н. Н. Калитин отмечает, что при одном и том же напряжении падающей лучистой энергии солнечные лучи дают ощущение меньшего тепла, чем лучи, испускаемые угольными лампами или другими низкотемпературными источниками излучения при приблизительно равных прочих условиях.

Хилл, кроме того, указывает, что лучи с длиной волны больше 2—3 мк вызывают стеснение дыхания и явления плохого самочувствия. В связи с этим Леконт даже рекомендует для излучателей с электроспиралью применять фильтры, поглощающие лучи с этими длинами волн.

Борхерт и Юбиц приводят следующие рекомендации Хеншке по допустимой плотности (дозе) облучения при излучении с различной спектральной характеристикой (табл. 40).

Таблица 40

Допустимая доза облучения при излучении с различной спектральной характеристикой

Область спектра ¹ в мк	Максимально допустимая плотность облучения ² в кал/см ² ·сек	Поглощенное излучение ³ в кал·см ² /сек
0,7—8	1,15	1,08
0,7—3	1,62	1,49
0,3—3,5	1,71	1,54
0,6—1,3	3,17	2,38

¹ Указанные значения представляют спектральные области, в которых плотность излучения понижена примерно на 5% максимальной.

² Под максимальной допустимой плотностью облучения понимается предельная плотность облучения, которую организм может пережить произвольно долго.

³ Рассчитано исходя из плотности облучения и потерь на отражение при различных длинах волн.

Здесь интересно сравнить все приведенные данные по спектральному воздействию на организм человека лучистой энергии с данными по спектральным характеристикам, применяемых газовых горелок инфракрасного излучения (см. рис. 22, 23, 24).

Горелки с керамическими насадками типа Гипрониогас имеют максимум излучения в интервале 2—2,15, а с керамико-металлическим — 1,5—2 мк, т. е. в интервале практического по-

глощения кожей человека тепловых лучей (максимальный нагрев).

Однако при обогреве помещений такими горелками может возникнуть превышение допустимой дозы облучения, что отрицательно скажется на самочувствии находящихся в помещении людей.

Реакция кожи на облучение не одинакова для различных участков тела человека, поэтому и температура этих участков не одинакова.

М. Е. Маршак, например, установил, что даже на двух участках кожи, лежащих рядом, температура их различна. Если (в его опытах) на щеке температура была равна $34,55^{\circ}\text{C}$, то на лбу она составляла $34,8^{\circ}\text{C}$; если на лопатке температура была $33,3^{\circ}\text{C}$, то на спине (несколько ниже лопатки) — $34,7^{\circ}\text{C}$ и т. д. Выявлена общая тенденция к снижению температуры по направлению от головы к ногам в пределах от $34,8$ (на лбу) до $31,5^{\circ}\text{C}$ (на ступне) — 29°C (на подошве). На уровне головы была наивысшая температура. И хотя Маршак не указывает, при каком виде обогрева (отопления) он проводил свои эксперименты (надо полагать, что при конвективном), все же это подтверждает мнение, что голова человека наиболее чувствительна к облучению, особенно при расположении излучающих устройств в верхней части помещения, и совпадает с нашими выводами, основанными на результатах проведенных исследований.

Одновременно с этим Маршак считает неправильными рекомендации некоторых авторов измерять температуру кожи на лбу, щеке, между пальцами руки или на груди, так как кожа щеки, лба и кистей рук имеет нестабильную температуру.

Маршак считает, что для выявления степени комфортности следует производить замеры температуры кожи не на открытых, а на покрытых одеждой частях тела. Он рекомендует измерять температуру кожи на туловище (на передней поверхности груди) исходя из того, что грудь и спина сравнительно с другими частями тела имеют наибольшую поверхность и, следовательно, являются главным источником теплопотери с поверхности тела.

На наш взгляд, это наиболее правильная с физиологической точки зрения методика определения комфортных условий для человека. Жизненный опыт показывает, что при обогреве туловища, особенно спины и ног, человек хорошо себя чувствует даже при относительно низких температурах воздуха. Поэтому при выполнении отопления помещения важно обеспечить минимальную разницу между температурой окружающей среды на уровне головы и температурой на уровне ступни или аналогично между температурой тела человека в верхней части (голова, туловище) и на нижних конечностях. Миссенар, например, считает разницу между результирующей температурой на уровне

голова и ступни для людей, находящихся как в сидячем, так и в стоячем положении, критерием в определении комфорта.

Рассматривая физиологическое действие инфракрасного излучения на человека, необходимо отметить действие инфракрасного излучения на органы зрения человека.

Для органов зрения инфракрасные лучи, особенно в интервале волн длиной $0,7—15\ \mu\text{к}$, представляют опасность. Продолжительное и достаточно сильное действие инфракрасного излучения может привести к серьезному повреждению глаз, вследствие того что они не имеют природной защиты от этого излучения. Исследования Ленгранда показали, что излучения с длиной волны $1—1,9\ \mu\text{к}$ особенно сильно нагревают хрусталик и водянистую часть глаза. Это вызывает ряд заболеваний и прежде всего так называемую светобоязнь, т. е. чрезвычайно высокую чувствительность глаз к свету, с болезненным ощущением.

Поэтому люди, профессия которых связана с длительным наблюдением за излучающей поверхностью горелок инфракрасного излучения, например при термической обработке материалов, деталей, изделий и т. д., должны пользоваться очками с соответствующими фильтрами, а при необходимости длительно нахождения вблизи горелок — защитными экранами из полированного алюминия.

2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ

В настоящее время при решении вопросов лучистого отопления с помощью нагрева ограждающих конструкций или специальных панелей применяются понятия средняя лучистая и результирующая температуры.

Средней лучистой температурой помещения называют ту поверхностную температуру, которую приняло бы тело при обмене излучением с окружающими ограждающими конструкциями, но без учета конвекции. Таким образом, средняя лучистая температура помещения регулирует теплопотерю человека излучением, как и соответствующая температура воздуха регулирует теплопотерю человека путем конвекции.

Понятие о результирующей температуре, служащей критерием тепловых ощущений человека в окружающей среде, более полно учитывает основные переменные условия, характеризующие среду, физиологическое состояние человека и защитные свойства его одежды.

Как уже указывалось, теплоотдача телом человека зависит при определенном характере его деятельности и одежды, от температуры ограждения $T_{ог}$, температуры воздуха $T_{в}$, степени влажности воздуха ϕ и от скорости движения воздуха v .

Результирующая температура равна одинаковым показаниям сухого и смоченного термометров в эквивалентной среде (т. е. в среде, создающей такое же тепловое ощущение), в которой температура ограждений равна температуре воздуха, а воздух неподвижен и имеет 100%-ную относительную влажность.

Таким образом, результирующую температуру можно выразить формулой

$$T_p = f(T_{ог}, T_{в}, \varphi, v).$$

В среде, имеющей вышеуказанные характеристики,

$$T_{ог} = T_{в}; \quad \varphi = 100\%; \quad v = 0; \quad T_p = T_{ог} = T_{в}.$$

В условиях обычных жилых, общественных и других помещений, где скорости движения воздуха сравнительно незначительны, значением v можно пренебречь.

Кроме того, в условиях комфорта для человека, находящегося в покое или выполняющего легкий труд и нормально одетого, при температуре около 18—20°С также можно пренебречь и теплотерей испарением. Таким образом, в этих условиях тепловые ощущения будут зависеть лишь от средней температуры ограждений и воздуха.

Тогда функция общего вида

$$T_p = f(T_{ог}, T_{в}, \varphi, v).$$

примет вид

$$T_p = f(T_{ог}, T_{в}).$$

Эту температуру в данном случае называют результирующей сухой температурой¹, которая характеризует тепловые ощущения человека в нормальных условиях в зависимости от средневзвешенной (средней лучистой) температуры ограждений, «видимых» из центра его тела и от температуры воздуха по сухому термометру.

Результирующая сухая температура равна:

$$T_{p,c} = \frac{T_{ог} + T_{в}}{2}.$$

Из данного выражения вытекает, что в помещении с температурой ограждений, равной $T_{ог}$, и температурой воздуха $T_{в}$ возникают такие же тепловые ощущения, как и в помещении, где температура ограждений и воздуха одинакова и равна $T_{p,c}$. Так, например (рис. 142), в помещении, где температура ограждений равна 20, а температура воздуха 16°С, тепловые ощущения будут такими же, как и в помещении, где температура ограждений 21, а температура воздуха 15°С. Поскольку сумма

¹ Во французском «Справочнике промышленной теплотехники» результирующую сухую температуру обозначают °М.

$T_{ог} + T_{в}$ в обоих случаях равна 36°С, такие же тепловые ощущения будут и в помещении с температурой ограждений и воздуха 18°С. Рассмотренный пример показывает, что при одинаковой результирующей сухой температуре, т. е. при одинаковых комфортных условиях, в случае лучистого отопления температура воздуха может быть значительно ниже, чем при конвективном.

В производственных условиях, особенно где имеется искусственная вентиляция или повышенная влажность при определе-

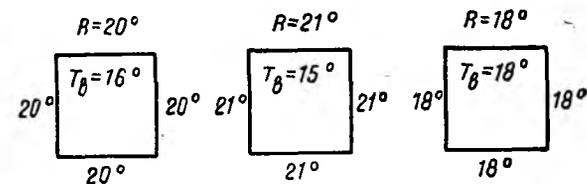


Рис. 142. Помещения, в которых тепловые ощущения, определяемые величиной $T_{p,c} = \frac{T_{ог} + T_{в}}{2}$, одинаковы

нии результирующей температуры, необходимо учитывать величины φ и v .

Результирующая температура зависит от вида деятельности человека, например при перемещении человека увеличивается относительная скорость движения тела и воздуха. При обычном хождении человек передвигается со скоростью 5 км/ч или 1,4 м/сек. Коэффициент конвекции в этом случае повышается с 3,5 до 11.

В условиях воздушной среды с температурой 10°С при лучистом отоплении создается для человека, находящегося в состоянии покоя, результирующая сухая температура 16°М. При передвижении его результирующая сухая температура понизится примерно до 12°М. Это благоприятно скажется на деятельности людей, одновременно находящихся в данном помещении, так как все они будут находиться в оптимальных, с физиологической точки зрения, условиях.

Миссенар считает, что предложенная им методика расчета систем лучистого отопления с нагреваемыми потолочными ограждающими конструкциями применима и для систем с подвесными панелями или горелками инфракрасного излучения при условии расположения их в так называемой «фиктивной» термической плоскости, суть которой заключается в том, что при расположении излучателей (панели, горелки ИК-излучения) на некоторой высоте от пола в помещениях больших размеров в плане в излучении участвует и потолок помещения. Миссенар

рекомендует формулу для определения средней температуры этой фиктивной термической плоскости

$$\tau = \frac{T + ns}{n + 1},$$

где T — температура нижней излучающей стороны панели в °С;

n — расстояние между осями панелей в м;

s — температура внутренней поверхности покрытия здания в °С (ширина панели составляет 1 м).

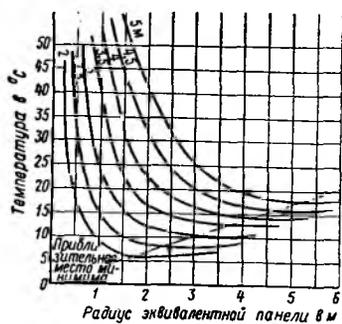


Рис. 143. Физиологические пределы температуры потолочных панелей (для стоящего человека), дающие разницу в 2° между средней радиационной (лучистой) температурой на уровнях головы и ступни при различной высоте помещения и при различных размерах панелей. Высота помещения показана на соответствующих кривых

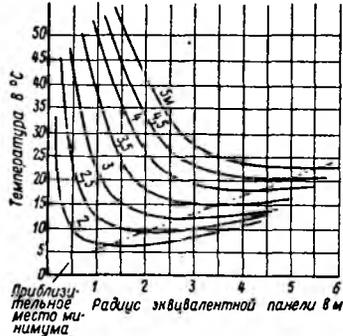


Рис. 144. Физиологические пределы температуры потолочных панелей (для сидящего человека), дающие разницу в 1° между средней радиационной (лучистой) температурой на уровнях головы и ступни, при различной высоте помещения и при различных размерах панелей. Высота помещения показана на соответствующих кривых

Одновременно с этим Миссенар дает графики физиологических пределов температур потолочных панелей для стоящего (рис. 143) и сидящего (рис. 144) человека при различной высоте помещения и при различных размерах панелей.

В зависимости от расстояния между осями панелей n , от высоты расположения панелей H и от размеров помещения в плане по указанным графикам находят величину предельной температуры τ этой фиктивной термической плоскости, исходя из которой определяют допустимую температуру панелей,

$$T = \tau(n + 1) - ns.$$

Для одиночных панелей (горелок) рекомендуется определять разницу между результирующей сухой температурой в

уровнях головы и ступни, применяя закон квадратов расстояний по формуле

$$\Delta = 10 \left[1 - \left(\frac{H-h}{H} \right)^2 \right],$$

где Δ — разница между результирующей сухой температурой в уровнях головы и ступни в °С;

H — высота подвеса в м;

h — разница уровней головы и ступни равна 1,6 м.

Одновременно с этим даются следующие формулы для определения радиуса эквивалентной панели для различных геометрических форм реальных панелей.

1. Для квадратной панели со сторонами a радиус эквивалентной круглой панели равен:

$$R = 0,56a.$$

2. Для прямоугольной панели со сторонами a и b

$$R = 1,12 \frac{ab}{a + b}.$$

Для панели в виде кольца или замкнутой прямоугольной рамы дается формула, определяющая предельно допустимую температуру на ее поверхности:

$$fT = \frac{f_2 T_2}{1 - \frac{f_2 T_2}{f_1 T_1}},$$

где T_1 — температура, которую должна была бы иметь круглая панель, эквивалентная внутреннему прямоугольнику;

T_2 — то же, для внешнего прямоугольника;

f , f_1 и f_2 — температурные факторы.

Давая эти рекомендации, Миссенар в то же время указывает, что они являются только теоретическими.

В отечественной практике при расчете лучистого отопления с использованием искусственно нагретых ограждающих конструкций или специальных панелей применяется методика, основанная на определении среднего излучения помещения (от всех ограждающих конструкций), отнесенного к 1 м² поверхности человека, исходя из известной формулы

$$g_{\text{ср.л}} = \frac{\Sigma(gF)}{\Sigma F} = \frac{g_{\text{п}} F_{\text{п}} + g_{\text{н.с}} F_{\text{н.с}} + g_{\text{ок}} F_{\text{ок}} + g_{\text{в.с}} F_{\text{в.с}} + g_{\text{пол}} F_{\text{пол}}}{F_{\text{п}} + F_{\text{н.с}} + F_{\text{ок}} + F_{\text{в.с}} + F_{\text{пол}}},$$

где $g_{\text{ср.л}}$ — среднее излучение помещения, отнесенное к 1 м² поверхности человека;

$g_{\text{п}}$, $g_{\text{н.с}}$ и т. д. — излучение отдельных поверхностей ограждений, отнесенное на одного чело-

века (от панели, наружных и внутренних стен, окон, пола, потолка);
 $F_{\text{н}}, F_{\text{н.с}}$ — поверхности ограждений.

Излучение отдельными поверхностями $g_{\text{н}}, g_{\text{пс}}$ и т. д. определяется по формуле

$$g = bc (t_{\text{р}} - t_{\text{ч}}) \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч},$$

где b — температурный фактор ($^{\circ}\text{K}$)³, определяемый по формуле

$$b = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{t_1 - t_2},$$

где T_1 и t_1 — абсолютная и в $^{\circ}\text{C}$ температура излучающего тела (ограждающей конструкции);

T_2 и t_2 — соответственно температуры облучаемого тела (человека).

Температурный фактор обычно берется по специальным таблицам или графикам.

На общую интенсивность облучения человека оказывает существенное влияние излучение потолков (перекрытий). Потолок нагревается от излучения обратной стороны горелок (панелей), а также за счет поднимающихся кверху горячих продуктов сгорания. При панелях этот дополнительный нагрев потолка происходит за счет конвективного нагрева воздуха.

Нагрев потолков, а следовательно, и их излучение тем выше, чем ближе к ним расположены горелки, чем меньше их теплопроводность и чем больше коэффициент поглощения лучистой энергии. Увеличение излучения потолков может быть также за счет повышения коэффициента отражения.

Как показывают исследования, допустимая температура излучающего потолка должна уменьшаться с понижением высоты помещения и увеличением площади потолка.

При малых высотах помещений (до 3—3,5 м) эта допустимая температура проходит через минимум, затем с увеличением площади потолка начинает снова увеличиваться.

Несмотря на то что нагретый потолок повышает результирующую температуру в рабочей зоне, Миссенар считает, что перегрев верхней части помещения является «напрасной затратой средств и поэтому его следует по возможности уменьшать или совсем не допускать».

Обработка статистических данных о самочувствии людей, проведенная Миссенаром, показала, что 90% чувствуют себя удовлетворительно (с точки зрения теплового ощущения) при разнице между результирующей температуры в уровнях головы и ступни примерно в 1° для сидящих и меньше 2° для стоящих (сухая результирующая температура в уровне ступни равна

приблизительно 18°M). Такие же результаты были получены и при конвективном отоплении, когда разница между температурой воздуха на уровне головы и ступни составляла 1° для сидящих и 2° для стоящих людей.

На основании этого сделаны выводы, что для обеспечения комфортных условий необходимо, чтобы разница между результирующей сухой температурой в уровнях головы и стопы для сидящих людей была не более $0,5^{\circ}\text{M}$, а для стоящих — не более 1°M . При этом допустимость более высокой разницы в температурах для людей стоящих объясняется тем, что для них влияние радиационной (лучистой) температуры на результирующую сухую температуру, а следовательно, и на тепловые ощущения менее заметно.

По мнению Миссенара «этот критерий, основанный на разнице между результирующей сухой температурой в уровнях головы и ступни, обладает тем преимуществом, что он дает возможность сравнивать комфортные условия при лучистом и конвективном отоплении».

Одновременно с этим Миссенар считает, что основной проблемой при устройстве отопления подвесных излучателей (панелей) является осуществление панелей, отдающих книзу значительную долю тепла.

Среди специалистов, занимающихся вопросами отопления с помощью инфракрасных излучателей, до настоящего времени нет единого мнения о системе расстановки (подвеса) этих излучателей в различных точках помещения.

На рис. 145 показаны различные варианты подвеса излучателей. Вариант *a* предусматривает максимальное облучение по-

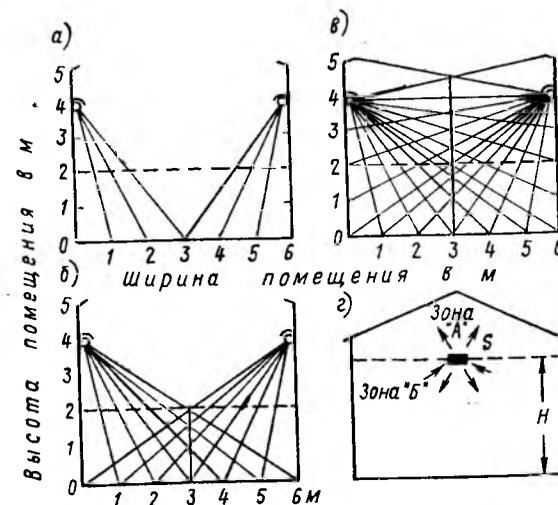


Рис. 145. Примеры расстановки излучателей в помещении

ла помещения по периметру на ширину до 3 м от стен. При этом стены не облучаются. Вариант б показывает равномерное облучение на уровне роста человека (1,6—1,7 м). Вариант в дает равномерное облучение на уровне роста человека и нижней части стен. Вариант г предусматривает вертикальное прямое облучение человека (пола) излучателями и вторичное потолком, нагреваемым за счет излучения обратной стороны излучателей и конвективного нагрева продуктами сгорания.

Некоторые специалисты-теплотехники, гигиенисты и физиологи считают, что постоянные температура, влажность и движение среды, окружающей человека, с физиологической точки зрения изнеживают организм и не позволяют достигнуть максимальной производительности труда.

Для повышения жизнедеятельности людей некоторые специалисты рекомендуют в течение рабочего дня в производственных помещениях менять комфортные условия путем периодического изменения (в небольших пределах от номинала до минимума) температуры внутреннего воздуха или интенсивности облучения.

Миссенар, например, рекомендует допускать колебания результирующей температуры в пределах 3°M , т. е. несколько более, чем обычно принято.

Из этого вытекает, что стремление к абсолютной равномерности облучения по площади помещения в уровне рабочей зоны неоправданно и можно допустить некоторую неравномерность этого облучения, особенно в помещениях, где люди не находятся длительное время на одном месте.

В литературе нередко положения, относящиеся к электроламповым инфракрасным излучателям, распространяются на панельные излучатели и даже на газовые горелки инфракрасного излучения, что никак нельзя считать правильным. В самом деле, если ламповые излучатели как излучатели точечные подчиняются законам Кеплера (квадратичная зависимость интенсивности излучения от расстояния до облучаемого объекта), Вина-Галицина (смещение максимума излучения в сторону высоких температур накала нити), Ламберта (зависимость интенсивности излучения от косинуса угла падения излучения на плоскость) и др., то панельные излучатели, а тем более газовые горелки инфракрасного излучения во многом не подчиняются этим законам.

Сравнивая кривые (индикатриссы) излучения по сфере лампового излучателя и панельного (косвенного) излучателя, а также горелки инфракрасного излучения, легко заметить значительное различие их между собой. Если, например, у лампового излучателя максимум энергии излучения лежит в направлении углов 75° и 105° (по отношению к плоскости излучения), то для панельного излучателя этот максимум лежит в направлении угла 90° (по нормали), а для горелки инфракрасного излучения угол максимума излучения меняется в зависимости

от конструкции излучающего насадка (диаметр каналов в перфорированных керамических решетках, величина ячеек в металлических сетках и др.). Следует также отметить, что эти показатели меняются для одного и того же излучателя в зависимости от расстояний между ним и точкой замера интенсивности излучения, от направления излучения, а также от мощности излучателя.

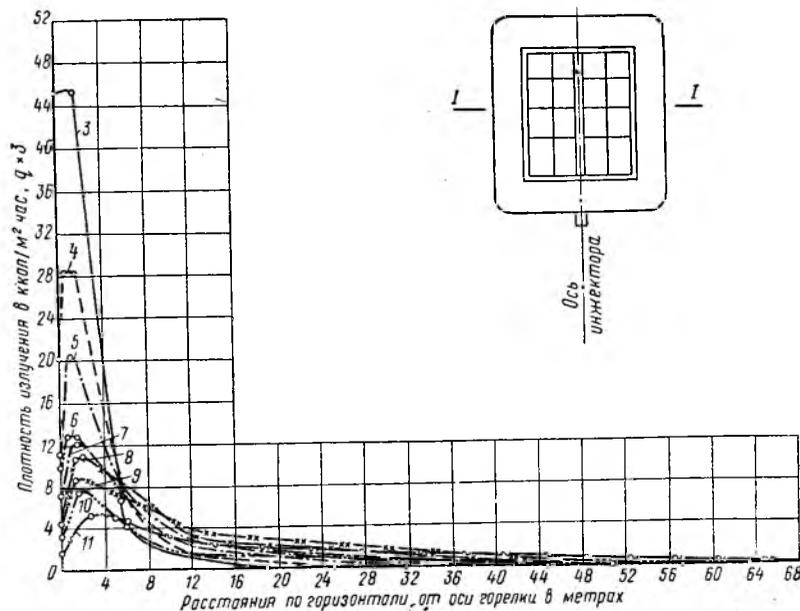


Рис. 146. Эпюра облучения поверхности в направлении по плоскости, перпендикулярной к излучающей поверхности горелки ГИИ-3, ГИИ-8 и расположенной по продольной ее оси (I—I). Цифры на кривых показывают высоту подвеса горелки над облучаемой поверхностью

Применительно к горелкам инфракрасного излучения эти показатели зависят от размеров излучающей плоскости и направления плоскости замера относительно плоскости излучения.

Как установлено, горелки инфракрасного излучения являются селективными излучателями, т. е. положение максимума излучения по отношению к длине волны излучения у них не зависит от степени нагрева излучающей поверхности.

Отсюда существующие рекомендации по расчету облученности для ламповых и иных излучателей не могут быть применимы для горелок инфракрасного излучения. Для этих горелок (при некруглой форме излучающей плоскости) нельзя ограничиваться построением только одной эпюры облучения плоскости, перпендикулярной к нормали, так как интенсивность излучения

у горелок инфракрасного излучения меняется по сфере не только в зависимости от угла излучения и расстояний, но и от направления относительно осей симметрии излучающей поверхности (рис. 146, 147, 148).

Указанные эпюры пригодны лишь для случая расположения излучателей параллельно облучаемой плоскости (например, по-

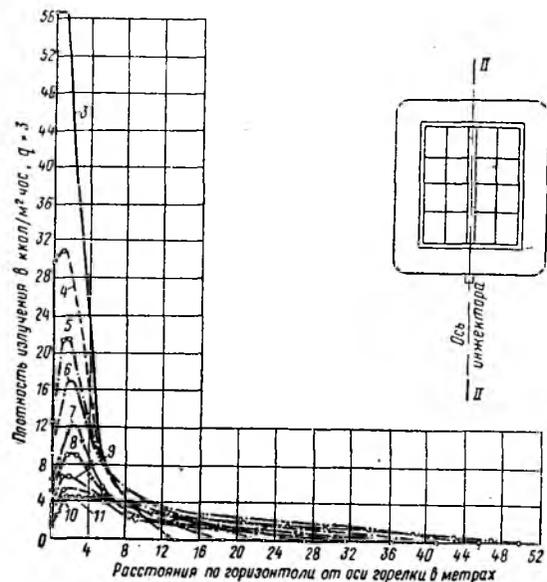


Рис. 147. Эпюра облучения поверхности в направлении по плоскости, перпендикулярной к излучающей поверхности горелки ГИИ-3, ГИИ-8 и расположенной по поперечной ее оси (II—II). Цифры на кривых показывают высоту подвеса горелки над облучаемой поверхностью

лу). При наклоне излучателей облучение той же плоскости значительно меняется.

Для каждого типоразмера горелок инфракрасного излучения некруглой формы должна быть составлена эпюра облучения к нормальной плоскости минимум по трем осям симметрии, к излучающей плоскости (поперечной, продольной, диагональной) для различных расстояний от нее (в пределах 3—15 м через каждый метр).

Эпюры облучения строятся на основании замеров прибором (радиометром, актинометром и т. п.) плотностей излучения в зависимости от высоты облучения и угла падения.

На основании эпюр того или иного типоразмера горелки можно построить эпюры суммарного облучения поверхности в направлении плоскости, перпендикулярной излучающей поверх-

ности горелки и расположенной по соответствующей ее оси симметрии (рис. 149). Построение этой эпюры сводится к тому, что на оси абсцисс в любом масштабе откладываются в обе стороны от нормали к каждой горелке расстояния (в м), а на оси ординат — суммарная облученность (плотность излучения), соответствующая принятой высоте подвеса горелок и расстоянию от нормалей. Затем концы отложенных отрезков соединя-

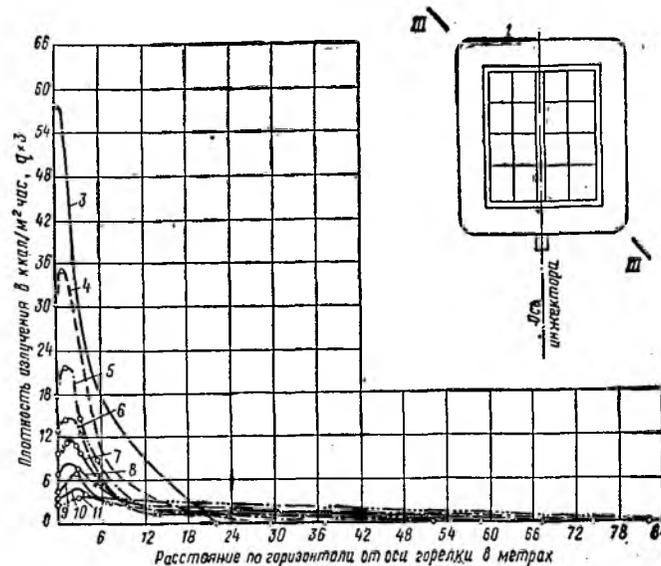


Рис. 148. Эпюра облучения поверхности в направлении по плоскости, перпендикулярной к излучающей поверхности горелки ГИИ-3, ГИИ-8 и расположенной по диагонали ее поверхности (III—III). Цифры на кривых показывают высоту подвеса горелки над облучаемой поверхностью

ются. По полученной кривой судят о величине и степени равномерности облучения.

Таким образом, при надежно проверенных данных по допустимым дозам облучения эпюры суммарных облучений позволяют быстро определять требуемое количество горелок и расстояние между ними. Здесь следует учитывать соответствие высоты подвеса расположению конструкций (мостовые краны, фермы).

Конечно, расчет отопления по эпюрам суммарных облучений нельзя считать совершенным, так как пока еще нет достаточно проверенных данных о комфортных условиях при соблюдении только допустимых доз облучения человека. Поэтому этот расчет можно рекомендовать только как приближенный при проектировании систем отопления с горелками инфракрасного излучения.

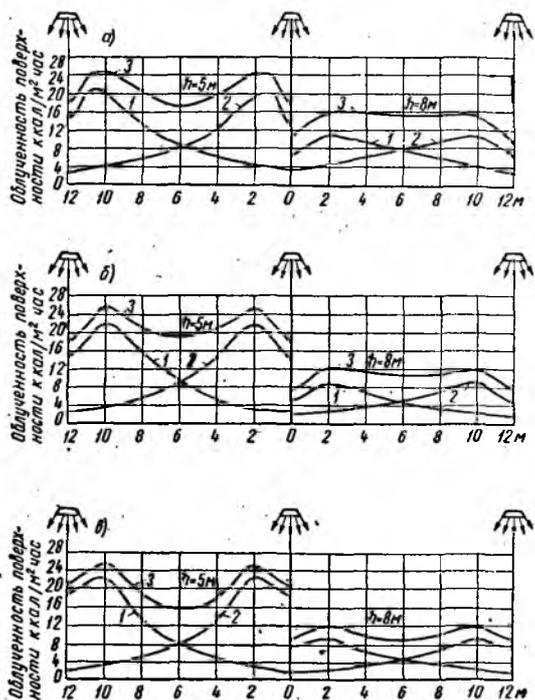


Рис. 149. Построение эпюры суммарного облучения поверхности несколькими горелками инфракрасного излучения

а — облучение в направлении плоскости по продольной оси симметрии; б — облучение в направлении плоскости по поперечной оси симметрии горелки; в — облучение в направлении плоскости по диагонали горелки

1 — облучение левой горелкой; 2 — облучение правой горелкой; 3 — суммарное облучение обеими горелками; h — высота подвеса горелки в м

В заключение следует сказать, что, хотя основной задачей отопления считается сохранение теплового баланса тела человека, все же один этот фактор, видимо, еще не может являться объективным критерием в оценке нормального состояния и самочувствия человека. Шахбазян, например, указывает, что состояние комфорта определяется не только сохранением теплового баланса, ибо такой баланс может быть результатом очень большого напряжения терморегуляторных механизмов.

С. И. Каплун также отмечает, что воздействие температур на организм нельзя трактовать только с калорийно-энергетически-термодинамических позиций. Летавец подчеркивает, что в изучении вопросов лучистой энергии нельзя ограничиваться физической и узкобиологической стороной вопроса. В этой области еще больше, чем в других областях взаимоотношений человека

с окружающей средой, необходим широкий гигиенический синтез.

Таким образом, несмотря на все большее расширение использования излучателей, особенно газовых горелок инфракрасного излучения, для целей отопления помещений и обогрева людей на открытых площадках диктуется необходимость дальнейшего проведения всесторонних исследований в этой области, учитывающих как теплотехническую, так и физиологическую сторону, и создания стройной научно обоснованной методики расчета и проектирования систем отопления с газовыми горелками инфракрасного излучения.

3. ОСОБЫЕ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В закрытых помещениях использование газовых горелок инфракрасного излучения связано не только с требованиями взрывобезопасности, но и с требованиями санитарно-гигиенических норм по состоянию атмосферы внутри этих помещений.

Требования взрывобезопасности регламентируются правилами Госгортехнадзора (правилами безопасности в газовом хозяйстве), и в отношении горелок инфракрасного излучения, установленных в помещении, они по существу ничем не отличаются от требований в отношении любого газового прибора. В отношении же обеспечения чистоты атмосферы помещений, в которых устанавливаются горелки инфракрасного излучения, возникают особые условия.

Как показывают многочисленные исследования горелок инфракрасного излучения и практически осуществленных отопительных установок, в помещениях с использованием этих горелок при нормальных эксплуатационных режимах работы (давление газа, тепловая нагрузка, приток воздуха и отвод продуктов сгорания) обеспечивается довольно высокая полнота сжигания газа в этих горелках.

В помещениях, обогреваемых горелками инфракрасного излучения, при указанных условиях концентрация окиси углерода в воздухе не превышает санитарно-гигиенических норм.

Однако это требует высококачественного проектирования, выполнения строительно-монтажных работ и правильной эксплуатации систем отопления и вентиляции.

Краткость воздухообмена в помещениях с обогревом горелками инфракрасного излучения должна быть такой, чтобы обеспечивалась ассимиляция водяных паров, углекислоты и окиси углерода, выделяемых горелками, а также производственных вредностей.

В конструктивном отношении систему вентиляции следует решать так, чтобы забор продуктов сгорания осуществлялся в максимальной близости от горелок. Однако при этом не должно создаваться больших скоростей движения воздуха вблизи го-

релок. Подачу воздуха в помещение рекомендуется осуществлять на таком расстоянии от горелок, чтобы не происходило сильного охлаждения излучающих поверхностей их и не сдувалась зона горения. Вместе с тем должен быть обеспечен беспрепятственный подвод воздуха к инжектору горелки для обеспечения полноты сгорания газа.

Работу вентиляции, в том числе и естественной, необходимо блокировать с подачей газа на горелки как по вытяжке, так и по притоку. К сожалению, иногда приток воздуха не блокируют с подачей газа, чем создают условия для неполного его сгорания в горелках.

Горелки, расположенные вблизи открывающихся дверей, окон и иных проемов, а также вблизи каких-либо движущихся частей оборудования, создающих сильные потоки воздуха, следует защищать от обдувания. При эксплуатации горелок, расположенных вблизи остекленных частей помещения, нельзя допускать разбитых стекол в непосредственной близости от горелок. При использовании фрагм в световых фонарях зданий для отвода продуктов сгорания наружу необходимо принимать меры против обдувания горелок сильными струями наружного воздуха. В процессе эксплуатации горелок должен обеспечиваться систематический контроль за режимом их работы.

Из-за отсутствия разработанных и проверенных методов расчета и проектирования систем газового инфракрасного отопления в некоторых организациях имеются суждения, что этот вид отопления не отвечает в полной мере санитарно-гигиеническим требованиям. Основанием для таких суждений служит то обстоятельство, что продукты сгорания газа из горелок инфракрасного излучения поступают непосредственно в отапливаемое помещение. Некоторые гигиенисты все еще полагают, что, несмотря на более совершенное сгорание газа в горелках беспламенного типа по сравнению с обычными горелками, все же не исключена возможность того, что в некоторых случаях при эксплуатации газового инфракрасного отопления содержание окиси углерода и других вредных веществ в воздушной среде отапливаемых помещений может достигать опасных для здоровья человека пределов. Эти опасения не имеют оснований.

Проведенные институтом ВНИИГаз работы по определению санитарно-гигиенических особенностей газового инфракрасного отопления показали следующее.

1. При должном выборе конструкции газовых инфракрасных излучателей и рациональной организации воздухообмена содержание окиси углерода в воздушной среде помещений с газовым инфракрасным отоплением не превышает существующих санитарных норм (0,002 мг/л).

2. Для повышения надежности работы целесообразно в системах газового инфракрасного отопления использовать только горелки с нижним подсосом воздуха. Испытания различных

горелок на экспериментальном стенде показали, что при выключенном воздухообмене горелки типа ГИИВ-1 через некоторый промежуток времени после их включения затухали. Это объяснялось тем, что в указанных горелках всасывающая камера расположена в средней части горелки и при любом ее положении в системе газового инфракрасного отопления в нее поступал обедненный кислородом воздух.

3. Для снижения капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а также для обеспечения более надежного воздухообмена в помещениях, особенно в предприятиях общественного питания, с газовым инфракрасным отоплением целесообразно применять рационально организованную естественную вентиляцию с краткостью воздухообмена, равной 3—4. При обеспечении в горелках нормального беспламенного сжигания газа (содержание СО в продуктах сгорания не более 0,005%) содержание окиси углерода в воздушной среде отапливаемого помещения не будет превышать 0,5—1 мг/м³, т. е. в полной мере будет отвечать существующим санитарным нормам.

4. Увеличение в объеме помещения содержания окиси углерода и других составляющих продуктов сгорания газа в инфракрасных излучателях в зависимости от кратности воздухообмена происходит лишь в первые часы работы горелок.

При дальнейшей работе горелок концентрация окиси углерода и других составляющих в воздушной среде отапливаемых помещений не изменяется.

4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГОРЕЛОК ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Основной экономический выигрыш, получаемый при применении лучистого отопления, состоит в том, что комфортный обогрев людей или оборудования до требуемой температуры происходит непосредственно лучистой энергией без участия окружающего воздуха.

При этом температура воздуха, нагревающегося лишь за счет конвекции от нагретых облучением ограждающих конструкций, значительно ниже, чем при конвективном (радиаторном) отоплении. В связи с этим лучистое отопление позволяет производить так называемый местный обогрев, т. е. поддерживать комфортные условия для людей лишь в тех местах (зонах) помещения, где они находятся, не подогревая воздух во всем объеме помещения. Следовательно, экономический выигрыш от лучистого отопления тем выше, чем больше (до некоторых пределов) по объему или площади помещение. Этот выигрыш еще больше увеличивается, если помещение (здание) используется для временного пребывания в нем людей (спортивные, зрелищ-

ные, производственные предприятия и места общественного питания).

С применением лучистого отопления посредством газовых горелок инфракрасного излучения стала возможной эксплуатация зданий легкого и даже летнего типа в холодное время года, что также дало определенный экономический эффект, так как при этом удлиняется период эксплуатации этих зданий, сокращаются расходы на эксплуатацию системы отопления, особенно в переходные периоды года.

Применение горелок инфракрасного излучения позволяет автоматизировать как включение-выключение, так и регулирование теплоотдачи всей системы отопления.

При радиаторном (конвективном) отоплении нагретый воздух поднимается вверх и не участвует в обогреве людей. Следовательно, при недостаточном утеплении верхней части зданий (например, в производственных зданиях) теплотери при конвективном отоплении будут значительно выше, чем при лучистом (с горелками инфракрасного излучения).

Таким образом, чем выше помещение, тем выгоднее применение инфракрасных излучателей.

В производственных зданиях, имеющих значительные объемы, в большинстве случаев применяется принудительная система вентиляции с многократным воздухообменом, необходимым для удаления производственного загрязненного воздуха. Устройство конвективного отопления в таких зданиях еще больше становится экономически невыгодным, поскольку температура воздуха при этом должна быть выше, чем в случае лучистого отопления. Правда, при значительном воздухообмене, связанном с технологической вентиляцией больших зданий, выгоднее бывает применить воздушное отопление.

Сейчас еще не представляется возможным дать точные цифры экономического выигрыша от применения отопления с горелками инфракрасного излучения, поскольку выполненные установки во многих случаях являются только опытными, однако многие специалисты по лучистому отоплению полагают, что экономический эффект лучистого отопления весьма велик. Так, например, Миссенар считает, что расход тепла при обогреве помещений потолочными панелями в общем на 5—10% меньше, чем при обогреве радиаторами. При этом он указывает, что чем больше излучатели отдают лучистой энергии вниз, тем выше экономический эффект, который может находиться в пределах 12—40% по сравнению с радиаторным отоплением.

С. А. Оцеп оценивает эту экономию тепла в 14%.

Институт Гипронегаз оценивает экономический эффект от внедрения системы отопления горелками инфракрасного излучения по сравнению с конвективным отоплением в пределах 25—35%.

При решении вопроса о целесообразности отопления горелками инфракрасного излучения следует помнить, что такая система отопления выгодна по сравнению с радиаторной в следующих случаях, когда:

а) требуется кратковременный обогрев (спортивные, выставочные, зрительные, торговые залы, помещения отдыха и обогрева людей, работающих при низких температурах окружения и т. д.);

б) люди сосредоточены на отдельных участках (зонах) производственных помещений;

в) нагрев воздуха невозможен или нет надобности в его нагреве (рабочие места на открытых площадках, открытые террасы, трибуны стадионов, платформы и залы ожиданий, крытые рынки и т. п.);

г) требуется обогрев зданий легкого или летнего типа в целях увеличения сроков их эксплуатации.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ ЛЕГКОГО ТИПА ГОРЕЛКАМИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Современная техника строительства, новые архитектурные решения конструктивных элементов зданий, сооружаемых из сборного железобетона, стекла, легких металлических сплавов и пластиков, требуют более гибкого экономически эффективно решения системы отопления.

Стены из стекла и металла не только придают зданию легкость, но и дают много света. Однако при обычном (конвективном) отоплении в холодное время создают дискомфортные условия для людей, пребывающих в этих зданиях.

Стекло и металл, как известно, имеют высокие коэффициенты теплопроводности, что обуславливает сравнительно низкие температуры на их поверхности с внутренней стороны помещений.

Повысить температуру этих поверхностей конвективными системами отопления без значительных затрат топлива невозможно (вследствие низкого коэффициента теплопроводности воздуха). К тому же нагрев конструкций в этом случае связан с нагревом всего объема воздуха в помещениях.

Решение задачи отопления зданий, выполненных из указанных материалов, т. е. создания комфортных условий для людей, находящихся в этих зданиях, значительно облегчается с применением газовых горелок инфракрасного излучения.

В Москве по проектам института Мосгазпроект были осуществлены системы отопления горелками инфракрасного излучения в нескольких зданиях общественного питания, выполненных в основном из стекла и алюминиевых сплавов. Первым таким зданием было кафе «Спорт» (рис. 150), по типу которого

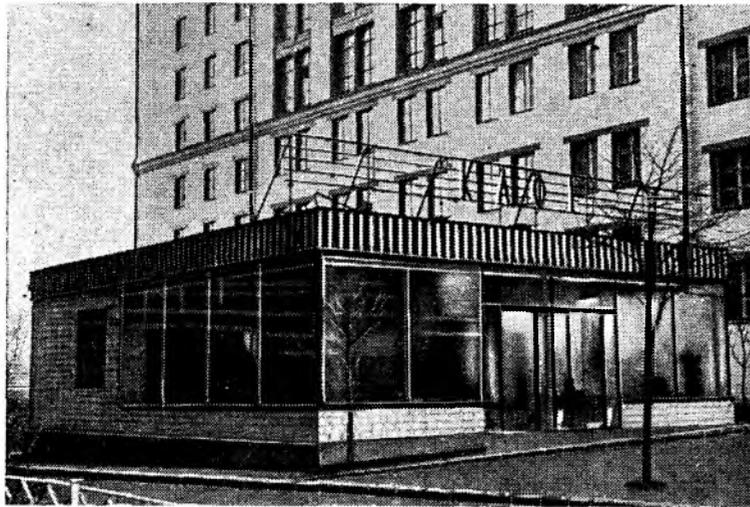


Рис. 150. Типовое кафе «Спорт», оборудованное горелками инфракрасного излучения

в дальнейшем сооружались многие другие здания того же назначения.

Здание состоит из двух частей: торгового зала с буфетной стойкой и служебного отделения (кухня, мойка, кладовые). Торговый зал имеет площадь 108 м^2 (12×9), высоту $3,5 \text{ м}$, объем $\sim 380 \text{ м}^3$. Стены служебного отделения выполнены из дырчатого кирпича (толщина 38 см), торгового зала также из дырчатого кирпича в пределах цоколя высотой 60 см над полом и из стекла толщиной около $1,5 \text{ см}$, обрамленного рамой из алюминиевого сплава с уплотнением резиновой прокладкой. Над рамой имеется карниз из железобетона. С фасада торгового зала имеется стеклянная дверь, открывающаяся в обе стороны. Пол бетонный по грунту с облицовкой метлахской плиткой. Перекрытие сборное из железобетонных плит, уложенных по металлическим балкам, с утеплением шлаковатой. Потолок в торговом зале выполнен из рифленых алюминиевых листов. Между перекрытием и потолком имеется зазор в 60 см , образующий общий вытяжной вентиляционный короб. В потолке устроены решетки для вытяжки продуктов сгорания от горелок.

Горелки укреплены на расстоянии около 350 мм (до поперечной оси симметрии) от потолка в виде спаренных бра по трем рядам (рис. 151) так, что от внешнего ряда до наружной стены расстояние составляет 2 м , а между рядами — 4 м .

Первоначально было установлено (по проекту) в торговом зале 18 горелок института Мосгазпроект производительностью 4300 ккал/ч каждая, но ввиду сильного облучения буфетниц,

вызывающего жалобы последних на головные боли и порчу продуктов (размягчение масла и пирожных, свертывание сыра и колбасы на бутербродах и т. д.), 4 горелки, расположенные над буфетной стойкой, были сняты.

При составлении проекта был произведен расчет теплопотерь зданием по общепринятой методике для радиаторных систем отопления при трех характерных для Москвы температурах

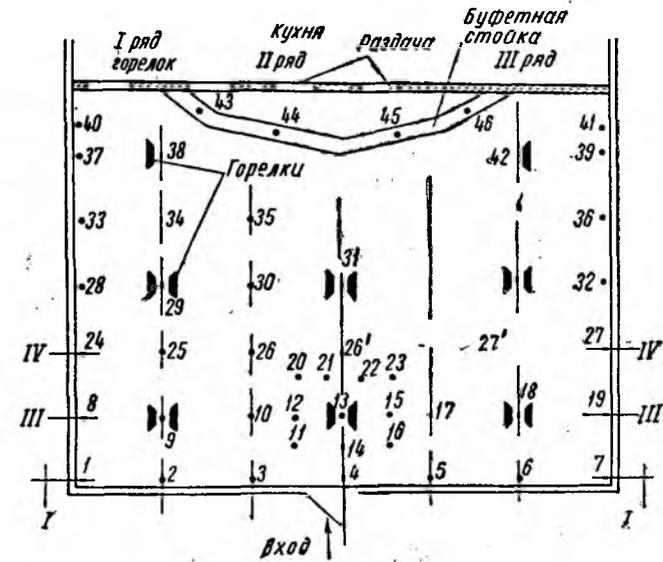


Рис. 151. Расположение горелок и точек замера температур в плане торгового зала кафе «Спорт»

наружного воздуха за отопительный сезон: до -6°C ; от -6 до -15°C и от -15 до -26°C . Температура воздуха внутри помещений была принята равной 15°C .

Таблица 41

Расчетные параметры отопления кафе «Спорт» горелками инфракрасного излучения

Температура наружного воздуха в $^\circ \text{C}$	Средняя внутренняя температура воздуха в $^\circ \text{C}$	Средняя лучистая температура в $^\circ \text{C}$			Расчетные теплопотери помещений в ккал/ч	Требуемое количество горелок в шт.
		потолка	пола	стен		
-6	15	30	17	2,5	26 000	6
-15	15	45	18	3	41 170	10
-26	15	45	10	1	62 000	16

При расчете теплотеря торгового зала учитывался лучистый теплообмен между излучающей поверхностью горелки и ограждающими конструкциями. После вычисления средних угловых коэффициентов для ограждений, участвующих в теплообмене, определялась средняя (лучистая) температура стеклянных (стеновых) панелей, пола и потолка.

Учитывая возможность максимального использования тепла отходящих газов, к. п. д. горелок принимался равным 98%.

Результаты расчета сведены в табл. 41.

Подача газа осуществляется отдельно на каждый ряд горелок. Пуск газа в горелки происходит после включения электрической спирали — запальника из нихрома, имеющейся на каждой горелке. После накала спирали до ярко-красного цвета вручную включается электропитание на соленоидный клапан, открывающий доступ газа на один ряд горелок.

Методика испытаний системы отопления. Целью испытаний системы отопления было установить соответствие температур внутреннего воздуха и ограждающих конструкций, а также путем замера радиометром определить величину облученности посетителей и обслуживающего персонала кафе «Спорт».

Испытания системы отопления проводились как во время работы кафе, так и после его закрытия. При необходимости в нерабочие часы имитировался вход посетителей в торговый зал путем периодического открытия дверей (при отборе проб внутреннего воздуха для анализа на содержание окиси углерода двери не открывались в течение 1—3 ч).

Для натопа выбрана установившаяся температура внутреннего воздуха 9—11°С. Показания контрольно-измерительных приборов снимались через 20—30 мин до установившегося состояния, когда приток тепла от горелок был равен теплотерям здания. Снятие замеров велось одновременно.

В задачу испытаний также входило выявление падения температуры воздуха и ограждающих конструкций по времени после выключения горелок.

При установившихся температурах воздуха производился замер доз облучения головы стоящего и сидящего человека в различных местах торгового зала.

Замерялась также степень влажности наружного и внутреннего воздуха по времени, скорость ветра, велись визуальные наблюдения за теплофизическим состоянием ограждающих конструкций, здания (потение, обледенение). Производился опрос посетителей об их тепловых ощущениях.

Измерительные приборы и их расположение в помещении. Поскольку основной интерес представлял торговый зал, то для размещения измерительных приборов в нем были выбраны характерные точки замера (см. рис. 151). Всего было намечено 46 точек.

Учитывая симметричность зала, полный объем замеров температур воздуха и поверхности ограждающих конструкций производился только в точках 1—4, 8—10, 12, 13, 24, 25 и 26. В остальных точках замеры производились эпизодически для контроля и сопоставления.

Для измерения температуры внутреннего воздуха использовались ртутные термометры с ценой деления 1°, защищенные от облучения специальными футлярами (рис. 152).

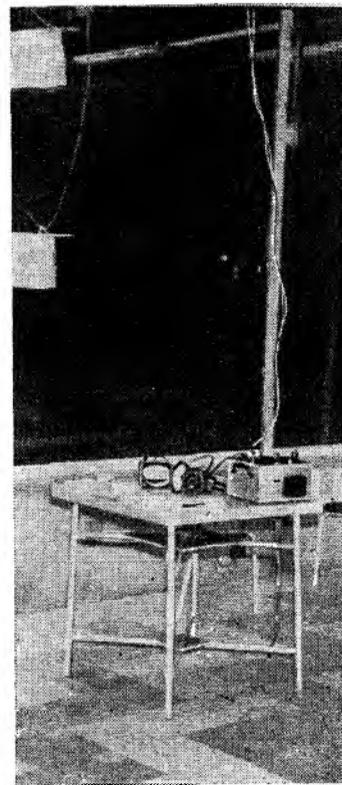


Рис. 152. Расстановка термометров, защищенных от облучения футлярами



Рис. 153. Замер температур поверхности ограждающих конструкций термометром

Футляры выполнены из алюминиевого листа толщиной 1 мм в виде овальных коробок без дна, прикрытых сверху также алюминиевой крышкой с зазором в 3 см, для свободного прохода воздуха через коробку. Размер крышки таков, что она перекрывает коробку и защищает от облучения ее внутреннюю полость, а следовательно, и термометр, помещенный внутри коробки. Коробка и крышка экранированы с внутренней стороны тонким листовым асбестом.

На уровнях менее 1—1,2 м от пола термометры помещались в алюминиевые полые цилиндры, вставленные один в другой и прикрытые сверху крышечкой — зонтом с зазором.

В стенке каждого цилиндра вырезана продольная щель по ширине и длине шкалы термометра.

После установки термометра во внутреннем цилиндре внешний цилиндр поворачивался вокруг оси так, чтобы щели перекрывались и термометр защищался от облучения. Для снятия показаний, наоборот, внешний цилиндр поворачивался так, чтобы щели совмещались и была видна шкала термометра.

При такой конструкции футляра значительно облегчалось снятие показаний. Правда, при этом от наблюдающего требовалась определенная быстрота действий во избежание нагрева термометра за счет его облучения.

Футляры с термометрами устанавливались на пол и подвешивались на специальных раздвижных стойках, упирающихся в пол и потолок помещения на высоте 1; 1,6 и 2 м от пола (см. рис. 152). Для защиты от облучения под футляры, устанавливаемые на полу, подкладывался листовой асбест и деревянные подкладки высотой 3 см.

Помимо экранированных ртутных термометров на указанных уровнях по высоте помещения размещались термографы, экранированные алюминиевой фольгой.

Определение температур на внутренних поверхностях ограждающих конструкций производилось с помощью экранированных термометров сопряжения с логометром и специальных термощупов (рис. 153).

Температура на излучающей поверхности горелок определялась с помощью оптического пирометра ОПИР-9 (см. рис. 152), а интенсивность излучения — актинометром конструкции Ленинградского института охраны труда и профзаболеваний. Величина доз облучения человека измерялась переносным радиометром конструкции Московского института им. Эрисмана.

Влажность воздуха определялась волосковым гигрометром и аспирационным психометром.

Величина скорости ветра и количество поступающего в помещение и удаляемого из него воздуха замерялись чашечным и крыльчатим анемометрами.

Отбор проб для анализа воздуха на содержание CO и CO₂ производился в аспираторы Коро в зонах дыхания человека, а для определения качества сгорания газа в инфракрасных горелках отбирались пробы продуктов сгорания на расстоянии 1—2 см от излучающей панели. Забор проб в этом случае производился через трубки с водяным охлаждением и с проволоочным фиксатором расстояния заборного отверстия от излучающей панели горелки.

Результаты испытаний. Испытания системы отопления производились при наружных температурах +2,5; —2; —12,5 и —20° С.

Для сопоставления приводим лишь данные по результатам испытания при наружной температуре воздуха —2 и —12,5° С.

Давление газа во всех случаях было в пределах 120—130 мм вод. ст.

Состав газа при испытаниях в среднем составлял в % (табл. 42).

Таблица 42

Состав газа	Средний состав газа в %	
	Годы проведения испытаний	
	1961—1962	1964—1965
CH ₄	91,6	97,24
C ₂ H ₆	3,1	0,6
H ₂	2	—
N ₂	2,3	1,71
CO ₂	0,15	0,1
O ₂	0,15	—
CO	0,7	—
C ₃ H ₈	0,7	0,17
C ₄ H ₁₀	—	0,18

Теплота сгорания газа в среднем 8400 ккал/м³. Первоначально испытания проводились при расположении горелок под углом 45° к плоскости пола. Испытания показали, что в этом случае помещение сильно перегревается, а доза облучения головы человека как стоящего, так и сидящего достигает значительной величины. Вследствие этого горелки были развернуты и установлены под углом 75° к полу. Результаты испытаний представлены в виде графиков.

Испытания при наружной температуре —2° С и скорости ветра 2,5 м/сек (работают четыре горелки среднего ряда). На рис. 154 показано распределение температур по полу торгового зала. Из рисунка видно, что при наклоне горелок под углом 45° к полу температура последнего несколько выше, чем при наклоне под углом 75°, причем в направлении к центру зала разница в температурах увеличивается.

Средняя температура пола составила 15—16° С. Температура пола у входной двери 11—13° С по ходу потока наружного воздуха, врывающегося через открытые двери.

На рис. 155 показано распределение температур по потолку при наклоне горелок под углом 75°. Температура потолка непосредственно над горелкой достигает 100° С, а в радиусе 1 м — 52—47° С. На большем расстоянии она снижается и находится в пределах 40—30° С в зависимости от расстояния.

На рис. 156 показано распределение температур по внутренней поверхности наружных стен в зависимости от высоты над полом. Средняя температура стеклянных панелей боковых стен составила 4—5° С, фасадной стены — 2—3° С.

Выгиб вниз в центре кривой, соответствующей температуре фасадной стены на уровне 5 см от пола, объясняется влиянием

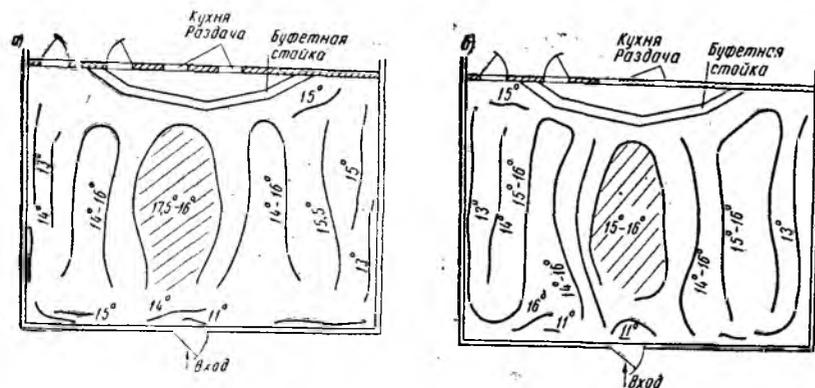


Рис. 154. Распределение температур по полу торгового зала при температуре наружного воздуха -2°C и при работе четырех горелок среднего ряда

а — при наклоне горелок под углом 45° к полу; б — при наклоне горелок под углом 75° к полу

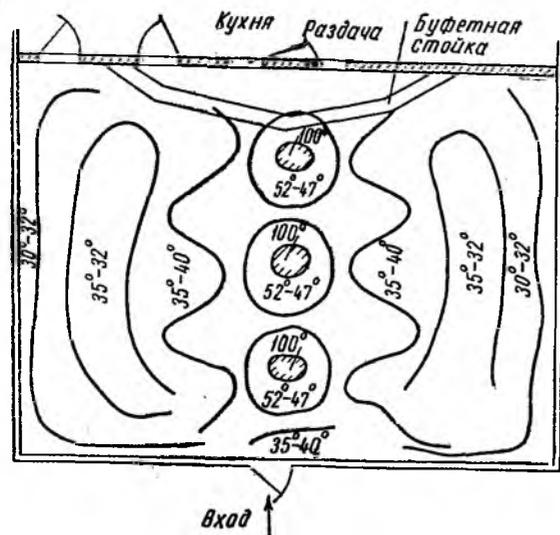


Рис. 155. Распределение температур по потолку при температуре наружного воздуха -2°C и при работе четырех горелок среднего ряда при наклоне их под углом 75° к полу

наружного воздуха, охлаждающего стеклянную дверь, расположенную по середине фасадной стены.

Вместе с тем более высокая температура стены у пола (на высоте 5 см) по сравнению с вышележащими участками объясняется тем, что в этом случае стена выполнена не из стекла, а из дырчатого кирпича (менее теплопроводна и ме-

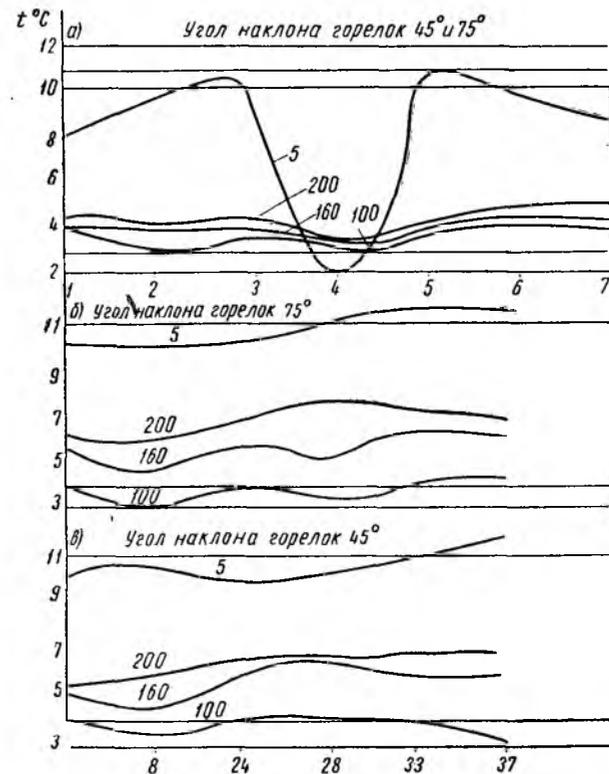


Рис. 156. Распределение температур по внутренней поверхности наружных стен

а — фасадная стена; б — боковая (правая) стена; в — боковая (левая) стена. Цифры над кривыми обозначают высоту замера температуры над полом в точках 1, 2, ..., 8, 24 и т. д.

нее проницаема для инфракрасных лучей). Кроме того, стена в этом месте несколько нагревается за счет излучения теплого пола.

Понижение температуры по середине правой (боковой) стены на уровне 100 и 160 см объясняется сильной инфильтрацией наружного воздуха в этом месте, вызванной некачественным выполнением резинового уплотнения вместе стыка стекла с металлической рамой.

В общем же температура стен почти не меняется при изменении наклона горелок от 45 до 75°. Вместе с тем по сравнению с температурой поверхности пола или внутреннего воздуха она значительно ниже (на 6—10°С).

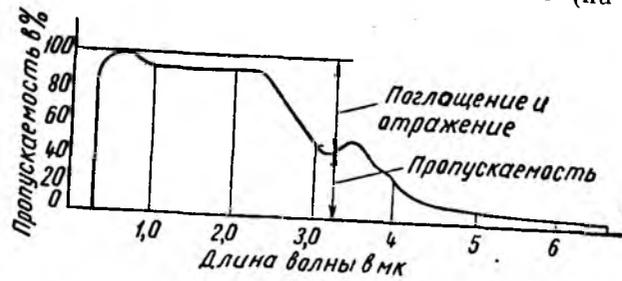


Рис. 157. Спектр поглощения бесцветного стекла

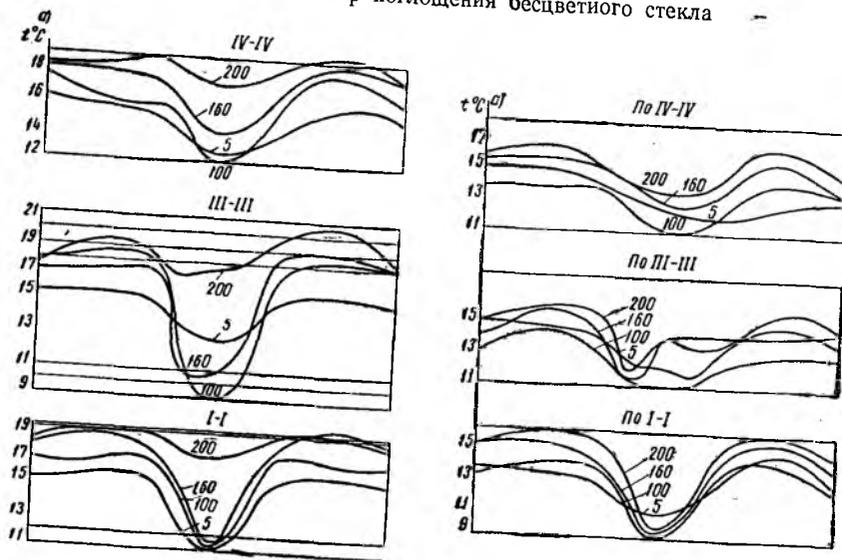


Рис. 158. Распределение температур внутреннего воздуха по площади и высоте торгового зала

а — при наклоне горелок под углом 45° к полу; б — при наклоне горелок под углом 75° к полу. Цифры над кривыми обозначают высоту подвеса термометров над полом

Это можно объяснить относительно высокой теплопроводностью и пропускаемостью инфракрасного излучения стекла. В самом деле из рис. 157 видно, что пропускаемость стекла по отношению к инфракрасному излучению с длиной волны в диапазоне 1,5—2,3 мк, т. е. в диапазоне максимума излучения горелок инфракрасного излучения, составляет 85—80%.

На рис. 158 показано распределение температур внутреннего воздуха по различным зонам и уровням в торговом зале. Как видно, влияние наружного воздуха, врывающегося через открываемые входные двери, сильно сказывается не только вблизи дверей, но и на значительном расстоянии от них (выгиб кривых посередине вниз).

Изменение наклона горелок от 45 до 75° также мало повлияло на изменение температуры внутреннего воздуха.

Средняя температура воздуха в помещении находилась в пределах 16—17°С. Непосредственно у наружных стен она бы-

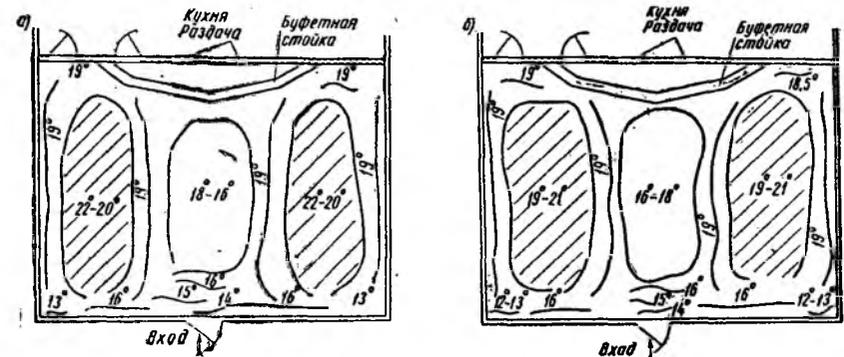


Рис. 159. Распределение температур по поверхности пола при температуре наружного воздуха —12,5°С и при работе 10 горелок, расположенных в I и III (крайних) рядах

а — при наклоне горелок под углом 45° к полу; б — при наклоне горелок под углом 75° к полу

ла несколько ниже (на 1—5°). Средняя температура у пола несколько выше, чем на уровне 1 м от пола. Это объясняется нагревом пола за счет облучения его горелками.

На рис. 159 показано распределение температур по полу того же торгового зала, но при температуре наружного воздуха —12,5° и при работе 10 горелок, расположенных в левом и правом (внешних) рядах. Средняя температура пола в этом случае составила 18—19°С, достигая в зонах, расположенных непосредственно под горелками, 20—22°С при наклоне горелок под углом 45° и 19—21°С при наклоне горелок под углом 75°.

Повышение температуры пола по сравнению с расчетной и ее более равномерное распределение по площади при угле наклона горелок 75° по сравнению с наклоном под углом 45° объясняется более интенсивным облучением за счет увеличения числа горелок, расположенных у наружных стен.

Распределение температур по поверхности потолка при наклоне горелок под углом 75° показано на рис. 160. Здесь видно, что непосредственно над горелкой температура достигает 100°С, а вблизи нее — 60—75°С, т. е. выше, чем в первом случае. Так-

же повысилась средняя температура потолка ($\sim 45^\circ\text{C}$), что можно объяснить увеличением его облучения задней стороной большого числа горелок и конвективным подогревом продуктами сгорания газа.

Распределение температур при наклоне горелок под углом 45° отличается лишь некоторым снижением температуры потолка над горелками.

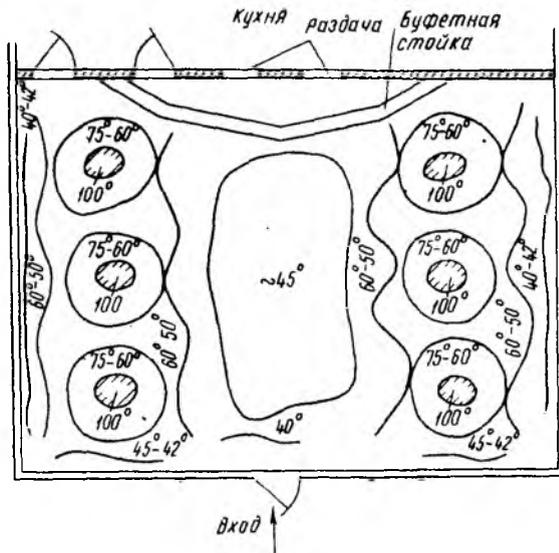


Рис. 160. Распределение температур по потолку при температуре наружного воздуха $-12,5^\circ\text{C}$ и при наклоне горелок под углом 75° к полу

На рис. 161 представлено распределение температур по внутренней поверхности наружных стен. Фасадная стена в среднем имеет температуру около 5°C , а боковые стены — в среднем $8,5-9^\circ\text{C}$.

Распределение температур внутреннего воздуха по торговому залу представлено на рис. 162. Средняя температура по залу составила $15-15,5^\circ\text{C}$. В центральной части зала она равнялась $13-13,5^\circ\text{C}$. Разница в температурах по высоте в пределах роста человека не превышала 2° . Из сравнения с рис. 158 можно видеть, что температура воздуха несколько снизилась, однако опрос посетителей показал, что большинство их чувствовали себя хорошо. Имелись лишь отдельные жалобы посетителей, сидящих без пальто спиной к наружным стенам на расстоянии $0,6-0,8\text{ м}$ и поблизости к двери. В первом случае имелось неприятное ощущение холодного потока от окон за счет инфильтрации наружного воздуха через некачественное уплотнение стыков стекла

с рамой, во-втором случае — за счет холодного дутья на уровне ног при открывании входных дверей. Особенно в этом случае жаловались женщины.

Замеры доз облучения головы стоящего и сидящего человека производились при наклоне горелок под углом 45 и 75° к полу. При этом облучение замерялось как со стороны одного, так и

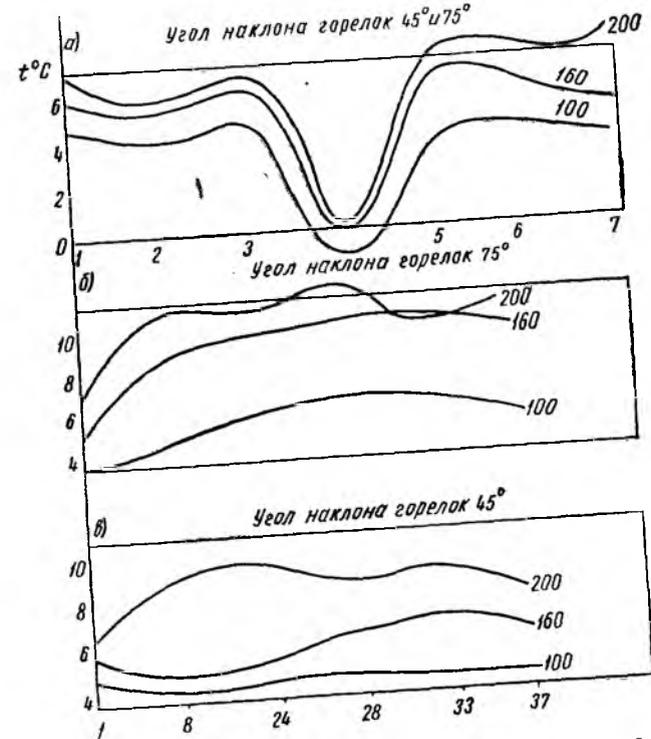


Рис. 161. Распределение температур по внутренней поверхности наружных стен при температуре наружного воздуха $-12,5^\circ\text{C}$

а — фасадная стена; б — боковая (левая) стена; в — боковая (правая) стена. Цифры над кривыми обозначают высоту измерения температуры над полом у стоек (в точках) 1, 2, ..., 8, 25 и т. д.

другого ряда горелок, работающих одновременно. Излучением третьего ряда горелок ввиду его незначительной величины пренебрегали.

На рис. 163 представлена схема точек замера доз облучения по площади торгового зала и результаты замера при наклоне горелок под углом 45° . Как видно из рисунка, наибольшее облучение имелось в точках 3 и 11 от левого ряда горелок и в точках 5 и 13 первого ряда горелок, т. е. в точках, расположенных

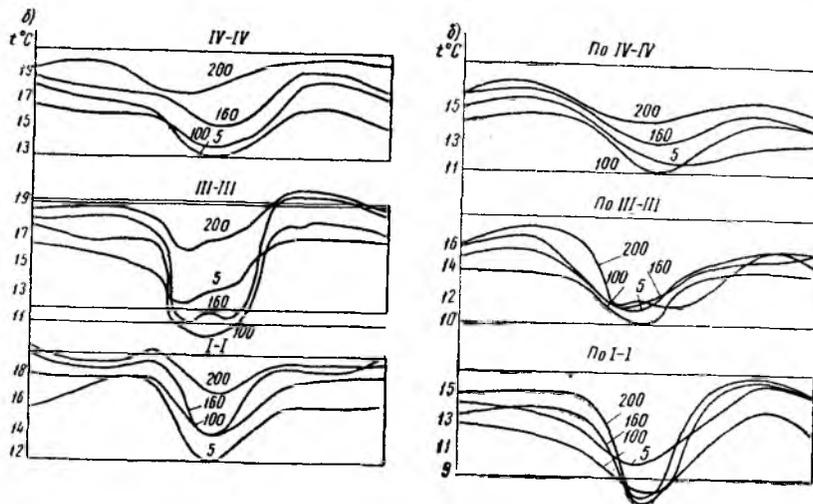


Рис. 162. Распределение температур внутреннего воздуха по площади и высоте торгового зала при температуре наружного воздуха $-12,5^{\circ}\text{C}$ а — при наклоне горелок под углом 45° к полу; б — при наклоне горелок под углом 75° к полу. Цифры над кривыми обозначают высоту замера температуры над полом

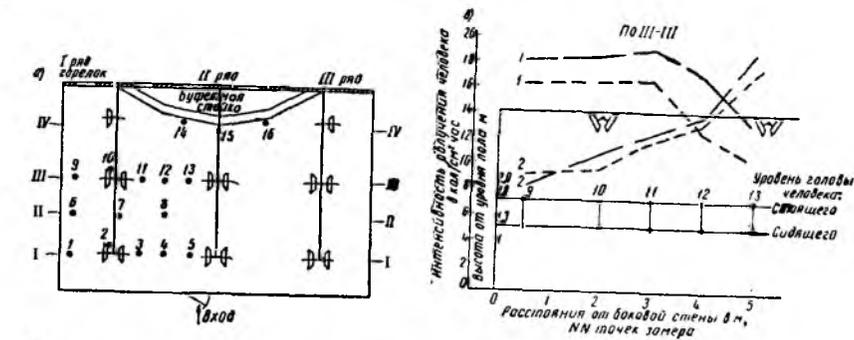
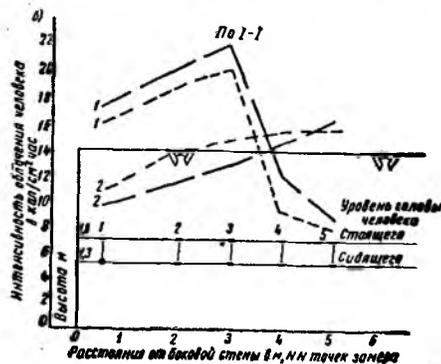


Рис. 163. Расположение точек замера и интенсивность облучения сидящего и стоящего человека при наклоне горелок под углом 45° к полу



а — схема точек замера; б — уровень доз облучения по сечению I-I; в — то же, по сечению III-III. Цифры на кривых обозначают номер ряда горелок. Сплошные кривые обозначают облучение на уровне головы стоящего человека, пунктирные — на уровне головы сидящего человека

почти на нормали к горелке. Наибольшая величина суммарной дозы облучения (от обоих рядов горелок) составила $36,4 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{ч}$ для стоящего человека и $35,5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{ч}$ для сидящего. Наименьшая доза в обоих случаях составила $23,5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{ч}$.

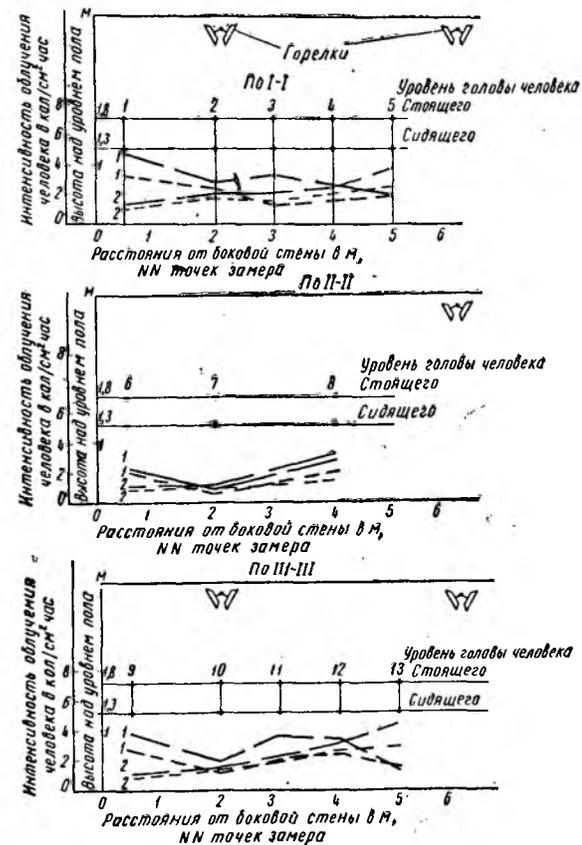


Рис. 164. Уровень доз облучения головы стоящего и сидящего человека в различных зонах торгового зала при наклоне горелок под углом 75° к полу

На рис. 164 показаны результаты замера доз облучения при наклоне горелок под углом 75° к полу.

Из рисунка видно, что интенсивность облучения не только значительно снизилась до $7,5$ (максимум) — $2 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{ч}$ (минимум), но и стала более равномерным по всей площади торгового зала. Средняя доза облучения стала $4-5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{ч}$, что близко к рекомендуемой Всесоюзным институтом общей и коммунальной гигиены Академии медицинских наук СССР.

Испытания при наружной температуре -20°C и скорости ветра $4,3 \text{ м/сек}$ (работают 14 горелок). При установке горелок с наклоном под углом 75° к поверхности пола получены следующие результаты.

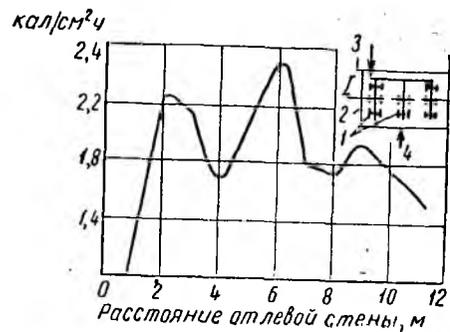


Рис. 165. Распределение доз облучения на уровне головы сидящего человека по сечению I—I в кафе «Спорт» после установки горелок теплопроизводительностью 2000—2000 ккал/ч

меры облучения, проведенные после замены горелок, показали (рис. 165), что суммарная доза облучения на уровне головы си-

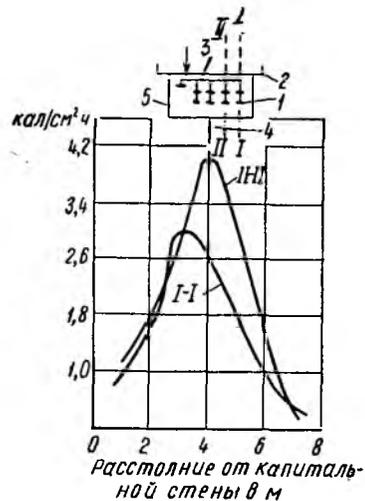


Рис. 166. Распределение доз облучения на уровне головы сидящего человека в нетиповом кафе «Урал» по сечениям I—I и II—II при подвесе горелок на высоте 2,88 м от уровня пола

1 — газовые горелки; 2 — капитальная стена; 3 — подача газа; 4 — вход; 5 — остекленные стены

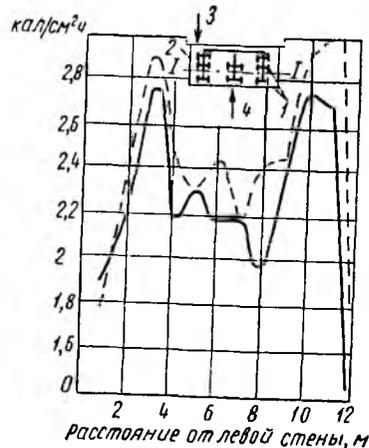


Рис. 167. Распределение доз облучения на уровне головы сидящего и стоящего человека по сечению I—I в типовом кафе «Яуза». Сплошная кривая — облучение на уровне сидящего человека; пунктирная кривая — облучение на уровне стоящего человека

1 — горелки; 2 — остекленные стены; 3 — подача газа; 4 — вход

дящего человека не превышает $2,3 \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$, а разница в величинах доз суммарного облучения не превышает $0,6—0,8 \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$.

Позднее ряд зданий легкого типа, в том числе более 10 аналогичных с кафе «Спорт», были также оборудованы отоплением с помощью горелок инфракрасного излучения. Проведенные испытания показали, что вследствие высокой мощности горелок ($3500—4000 \text{ ккал/ч}$), низкого подвеса их над полом (менее 3 м) наблюдались неравномерное облучение людей и в ряде случаев высокие дозы облучения. Так, например, в кафе «Урал» (рис. 166) при высоте подвеса горелок 2,9 м непосредственно под ними на уровне головы сидящего человека плотность облучения достигала $6,1 \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$, у стен же вдали от горелок она составляла $0,6—1 \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$.

На рис. 167 представлено распределение доз облучения в кафе «Яуза». Как видно из рисунка, облучение по длине торгового зала весьма неравномерно и наибольшее его значение $2,8—3 \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{ч}$ имеет место под крайними рядами горелок. Это объясняется тем, что горелки среднего ряда были установлены ближе к вертикали, поэтому их излучение накладывалось на излучение горелок крайних рядов.

На рис. 168 показано распределение доз облучения человека по длине торгового зала кафе «Спартак» при работе двух рядов (левого и среднего) горелок. Здесь также характерна большая неравномерность облучения не только между зонами под работающими и неработающими горелками, но и между зонами под горелками крайнего и среднего рядов на уровне стоящего человека. Это объясняется неправильным наклоном горелок среднего ряда, излучение которых накладывается на излучение горелок крайнего (левого ряда).

При испытаниях также выявился значительный перегрев ограждающих конструкций и внутреннего воздуха в торговых залах указанных кафе, если при достаточно высоких температурах ($0—6^{\circ}\text{C}$) наружного воздуха включаются все горелки.

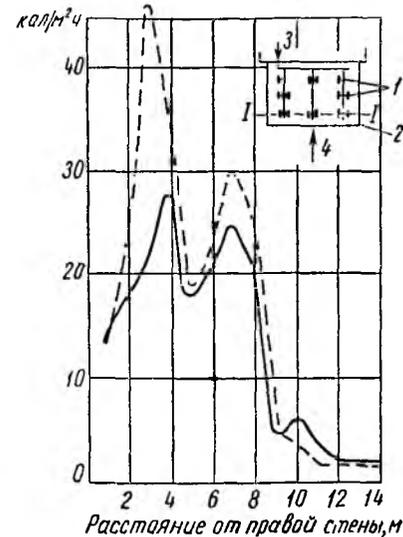


Рис. 168. Распределение доз облучения на уровне головы сидящего и стоящего человека по сечению I—I в типовом кафе «Спартак». Сплошная кривая — облучение на уровне сидящего человека, пунктирная — на уровне стоящего человека

1 — горелки; 2 — остекленные стены; 3 — подача газа; 4 — вход

Так, например, при температуре наружного воздуха 0; 6,5° С температура внутреннего воздуха на высоте 1 м от пола через довольно короткий промежуток времени (20—25 мин) поднимается от 10—11 до 19—23° С. Температура пола — от 7 до 26° С. Температура остекленных стен — от 4 до 19° С.

Отсутствие горелок меньшей теплопроизводительности (до 2000—2500 ккал/ч) не позволило обеспечить в описанных зданиях необходимые равномерность и величину доз облучения, как это было достигнуто в кафе «Спорт».

На основании проведенных испытаний и более чем четырехлетнего опыта эксплуатации значительного числа типовых зданий общественного питания легкой конструкции в Москве можно сделать следующие выводы и рекомендации.

При удовлетворительных тепловых ощущениях людей, находящихся в кафе, температура ограждающих конструкций в основном не совпала с теоретической, за исключением температуры пола при принятом режиме для температуры наружного воздуха от —6 до —15° С. Средняя температура потолка превышала расчетную на 7—35°, а средняя температура стен — на 2—6°. Средняя температура воздуха внутри помещения почти совпала с расчетной. Она либо превышала расчетную на 1—3° (при температуре наружного воздуха до —6° С), либо была ниже ее на 1—2° (при температуре наружного воздуха ниже —15° С).

Колебание температуры воздуха внутри помещений по высоте в пределах роста человека не превышало 2—2,5°.

Наилучшие тепловые ощущения посетителей и обслуживающего персонала кафе типа «Спорт» наблюдались при температуре внутреннего воздуха 13—15° С и суммарной плотности (дозе) облучения их на уровне головы в пределах 40—50 ккал/м² · ч.

Потоки наружного воздуха, врывавшегося в помещение через открываемую дверь, весьма отрицательно сказывались на тепловых ощущениях людей. Также отрицательно сказывалась инфильтрация наружного воздуха через неплотности в стеклянных панелях (стенах) здания.

Стабильность температуры ограждающих конструкций и внутреннего воздуха наступает через 20—25 мин после включения горелок.

Отопление газовыми горелками инфракрасного излучения при обеспечении нормальной работы приточно-вытяжной вентиляции не представляет опасности в смысле загрязнения внутренней атмосферы помещений окисью углерода или углекислотой, а также повышения ее влажности.

Содержание СО в продуктах сгорания хорошо отрегулированных горелок не превышает 0,005% по объему, т. е. не выходит за пределы установленных норм.

Содержание СО в воздушной среде помещений, обогреваемых горелками инфракрасного излучения, незначительно отли-

чается от содержания СО в наружном воздухе. В большинстве обследованных кафе содержание СО в помещениях после длительной работы горелок не поднималось выше чем на 6—7 мг/м³.

Газовые горелки инфракрасного излучения также не представляют пожарной опасности, если они расположены не ближе 1 м от сгораемых конструкций.

Вместе с тем отопление горелками инфракрасного излучения позволяет удлинить срок эксплуатации помещений легкого, даже летнего типа.

Значительное влияние на работу газовых горелок инфракрасного излучения оказывает стабильность давления газа перед ними. Пределы колебания давления газа не должны превышать 20—25% номинала.

Как уже указывалось выше, устройство отопления с помощью горелок инфракрасного излучения более выгодно в зданиях большого объема. Примером такого отопления может служить отопление производственных цехов завода тяжелых зуборезных станков, осуществленное по проекту института Гипрониигаз. Отопление смонтировано в гидропескоочистном отделении литейного цеха. Цех имеет длину 30 и ширину 12 м. Объем отапливаемого помещения составляет 3450 м³. Стены цеха выполнены из кирпича (толщиной 2 кирпича), перекрытие — из железобетонных плит толщиной 12 см, пол земляной.

Горелки ГИИ-8 теплопроизводительностью 6400 ккал/ч, работающие при давлении газа в 3000 мм вод. ст., в количестве 20 шт. подвешены к фермам на высоте 8 м от уровня пола.

Проведенные испытания данной системы отопления показали следующие результаты.

Плотность облучения на уровне пола составила 238—110 ккал/м² · ч. Такая неравномерность облучения может объясняться несоответствием расстояний между горелками вдоль и поперек здания.

При температуре наружного воздуха от —6,5 до —9,7° С и при скорости ветра 2,7 м/сек температура пола в середине здания достигала 22,7° С. У внутренних стен она составляла примерно 22° С, у наружных стен — 18° С, в углах здания — 16,3° С.

Средняя температура внутренней поверхности наружных стен в рабочей зоне составляла около 18° С с понижением у пола до 17° С за счет инфильтрации наружного воздуха в ворота и окна. На высоте более 7 м температура наружных стен падает до 16° С, затем снова растет до 23° С. Такое явление объясняется тем, что на уровне несколько выше 7 м стены выходят из зоны облучения, а выше 8 м они подогреваются продуктами сгорания от горелок.

Температура внутреннего воздуха на высоте 0,5 м от пола составляла примерно 13° С, а на высоте от 1 до 4 м она равнялась 12° С. Выше 4 м от пола температура воздуха достаточно быстро росла почти по прямой и на высоте 10 м достигала 28° С.

Этот рост температуры воздуха объясняется нагревом его за счет сильной запыленности (в пределах 4—8 м от пола) и нагревом продуктами сгорания (выше 8 м от пола).

Относительная влажность воздуха в рабочей зоне после 3 ч работы горелок понизилась с 76 до 69%, а в зоне выше подвеса горелок, наоборот, поднялась до 83%.

Понижение относительной влажности в рабочей зоне объясняется повышением температуры воздуха, а в верхних горизонтах — выделением значительного количества влаги при сгорании газа. Организованный отвод продуктов сгорания из верхней зоны здания, предусмотренный проектом, не был выполнен, поэтому повышались относительная влажность и температура воздуха в этой зоне.

Опрос работающих в цехе показал, что более 90% испытывают хорошее тепловое самочувствие. Более 70% рабочих ощущают тепло сразу же, как только попадают с улицы в цех, 30% — через 0,5—1 мин.

Содержание окиси углерода в воздухе цеха (в рабочей зоне) до включения горелок составляло 0,002%. После 3 ч работы горелок — 0,0027%, т. е. очень незначительно изменилось.

С устройством лучистого отопления в данном цехе значительно повысилась производительность труда рабочих и снизилась заболеваемость.

Таким образом, это еще раз подтверждает выгодность устройства отопления производственных цехов горелками инфракрасного излучения. Конечно, следует и дальше вести всестороннее наблюдение за существующими системами лучистого отопления и осуществлять экспериментальные установки для накопления данных по их расчету.

При устройстве и эксплуатации систем отопления с помощью газовых горелок инфракрасного излучения помимо экономических факторов следует руководствоваться следующими соображениями.

1. Для стабилизации давления газа перед горелками подключение их по возможности производить к сетям повышенного давления с установкой регулятора давления на всю группу горелок данного объекта.

2. Должно быть обеспечено надежное удаление продуктов сгорания. Выполнение вентиляционных систем следует осуществлять в соответствии с указаниями, изложенными в § 3 настоящей главы.

3. В целях повышения к. п. д. горелок продукты сгорания целесообразно направлять через систему каналов, омываемых приточным воздухом, не снижая, однако, температуру их до точки росы.

4. Расстановку горелок следует производить так, чтобы обеспечивалось относительно равномерное и в допустимых пределах

(дозах) облучение людей по всей площади и высоте помещения, на которых они могут находиться длительное время. При сосредоточении людей на определенных ограниченных участках помещения горелки следует устанавливать вблизи этих участков и сосредоточивать на них максимум излучения (в пределах допустимых норм).

Наилучшим решением в расстановке излучателей (горелок) является такое, при котором обеспечивается максимальная равномерность облучения человека по всей его поверхности от головы до ног. При этом необходимо исключить возможность затенения, загоразивания горелок от человека конструкциями здания, оборудованием, мебелью и т. д. Это может быть достигнуто путем установки большего числа горелок с меньшей их производительностью с учетом, конечно, экономической и технической целесообразности.

5. Для возможности регулирования величины доз облучения при изменении температуры наружного воздуха или тепловыделений внутри помещений, а также при облучении зданий солнцем рекомендуется горелки устанавливать ярусами по высоте (если это позволяет высота и конструктивное оформление помещения, а также оборудование, размещаемое в нем) или в виде панелей, состоящих из групп горелок и расположенных на одном уровне по высоте помещения. Регулирование плотности (дозы) облучения при таких размещениях горелок производится путем поярусного выключения-включения их или путем выключения-включения части горелок в панели. Одним словом, плотность облучения должна меняться не в отдельных зонах помещения, а во всех точках излучения, т. е. должно обеспечиваться сохранение равномерности и направления облучения. Нельзя допускать регулирования плотности излучения путем снижения теплопроизводительности горелок более чем в пределах 8—10% за счет уменьшения подачи газа в них. Это может вызвать неполноту сгорания газа и образование окиси углерода и даже погасание горелок.

6. В зданиях с большими застекленными поверхностями в наружных стенах нецелесообразно допускать облучение этих поверхностей во избежание больших теплотерь. В целях уменьшения «отрицательной радиации» остекленных поверхностей рекомендуется сочетать их с панелями из полированного алюминия, облучаемыми горелками.

Следует отметить, что использование полированного алюминия для облицовки внутренних поверхностей стен при отоплении инфракрасными горелками позволяет обеспечить комфортные условия при выполнении этих стен с пониженным термическим сопротивлением и уменьшить теплотери через ограждающие конструкции. Особенно хорошо устраивать облицовку стен алюминием под остекленными поверхностями и между ними (простенки). В исключительных случаях можно допус-

тить облучение остекленных поверхностей от пола на высоту 2—3 м, чтобы снизить «отрицательную радиацию».

7. Во всех случаях необходимо принимать меры против инфильтрации наружного воздуха в помещения, отапливаемые горелками инфракрасного излучения. Наружный вход должен быть оборудован шлюзом, обеспечивающим подогрев наружного воздуха перед поступлением его в помещение.

8. В основу расчета отопления горелками инфракрасного излучения кладется определение высоты подвеса и расстояния между излучателями при обеспечении допустимых доз облучения людей на уровне головы, а также равномерности облучения в пределах 10—20% номинала. Определение этих параметров производится по эюграм облучения плоскости для каждого типоразмера горелки.

9. Следует иметь в виду, что действие инфракрасного обогрева в закрытом помещении после включения горелок сказывается лишь в нагреве излучением, падающим непосредственно на человека.

В этот период воздух еще холодный. Однако чем дольше действует отопительная установка, тем сильнее нагреваются окружающие конструкции и предметы, а от них и воздух. Поэтому через некоторое время тепловые ощущения человека изменяются в сторону повышения.

Учитывая это, следует после сравнительно длительного периода работы горелок снижать плотность облучения.

10. Необходимо обеспечивать минимальную скорость движения воздуха в зоне нахождения людей, обогреваемых инфракрасными излучателями. В противном случае их тепловые ощущения будут ухудшаться.

11. Материал пола должен обладать максимальной поглощательной способностью инфракрасного излучения. В этом случае пол быстро нагревается и благоприятно действует на тепловые ощущения человека.

12. При большом количестве горелок или высоком подвесе их над поверхностью пола следует применять дистанционное включение и выключение этих горелок. В других случаях можно пользоваться ручным зажиганием.

13. При эксплуатации горелок необходимо следить за их чистотой. Пыль и копоть от факелов при ручном зажигании следует немедленно удалять, в противном случае сгорание газа может быть неполным.

14. При отсутствии автоматического контроля за горением газа в горелках должно быть обеспечено непрерывное наблюдение за их работой.

15. После длительного перерыва в работе системы отопления горелками инфракрасного излучения (на летний период) помимо проверки работоспособности и плотности всей запорно-регулирующей арматуры, приборов и автоматических устройств не-

обходимо очистить от пыли и грязи все горелки. Лучше всего следует производить обдувку горелок сжатым воздухом или обработку пылесосом.

16. При ручном зажигании горелок (факелом) следует поднести огонь к излучающей поверхности горелки, а затем открыть газовый кран.

17. При эксплуатации газовых горелок инфракрасного излучения должны строго выполняться все требования безопасности, относящиеся к газовым приборам, устанавливаемым в помещениях.

18. При проектировании особое внимание необходимо уделить расположению газовых горелок по отношению к строительным конструкциям зданий, выполненным из сгораемых или трудносгораемых материалов, не допуская перегрева последних.

Все высказанное выше свидетельствует о возможности широкого применения инфракрасных газогорелочных устройств в системах отопления зданий из легких строительных конструкций, как, например, кафе, крытые рынки, рестораны, столовые, буфеты, магазины, гимнастические залы, бассейны, крытые стадионы и другие отапливаемые спортивные сооружения и т. д.

В производственных зданиях и помещениях, отнесенных по пожарной опасности к категориям А, Б и В, применение газовых горелок инфракрасного излучения не допускается.

Производственные неутепленные здания, помещения и отдельные рабочие места также могут отапливаться при помощи газовых горелок инфракрасного излучения, действующих периодически.

6. ОСОБЕННОСТИ ОБОГРЕВА ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДОК И ТРЕБОВАНИЯ К ГОРЕЛКАМ

С появлением горелок инфракрасного излучения, работающих на относительно дешевой топливе (газе) и создающих довольно мощный поток лучистой энергии, представилась возможность организации обогрева людей и оборудования на открытом воздухе при низких температурах, причем при использовании сжиженного газа обогрев может быть осуществлен в любом месте, независимо от источника снабжения газом.

Правда, условия работы горелок на открытом воздухе значительно отличаются от условий работы их в помещениях. При расположении горелки на открытом воздухе при низкой его температуре она подвергается не только значительному охлаждению, но прежде всего обдуванию ветром, что отрицательно сказывается на ее аэродинамике. Набегающие на излучающую поверхность горелки струи воздуха, во-первых, охлаждают ее, и, следовательно, снижают мощность лучистого потока, во-вторых, создают подпор, препятствуя удалению продуктов сгорания из зоны горения и, следовательно, вызывают неполноту сгорания

газа. При некоторой скорости ветра, направленного на излучающую поверхность горелки, последняя вообще может погаснуть. Как показали исследования, обычные горелки инфракрасного излучения, применяемые в помещениях и имеющие даже стабилизирующую горение металлическую сетку, гаснут при скорости ветра свыше 2—3 м/сек. При скорости ветра свыше 0,3—0,5 м/сек горелка уже работает неустойчиво — резко снижается температура излучающей поверхности (с 800—900 до 600—550° С, а на отдельных участках — и до более низкой температуры), увеличивается неполнота сгорания газа.

В целях повышения стабильности горения газа в горелках при обдувании их ветром стремятся либо повысить аэродинамическое сопротивление горелок путем уменьшения сечения огневых отверстий и повышения давления газа перед горелкой, либо уравновесить давление воздуха перед огневыми отверстиями и инжектором путем устройства специальных кожухов, сообщающих входное отверстие инжектора с атмосферой со стороны излучающей поверхности.

Здесь, однако, следует сказать, что эти мероприятия дают только некоторое повышение сопротивляемости горелки задуванию (погасанию), но отнюдь не обеспечивают в какой-либо степени стабильность мощности излучения, что, как известно, является главным в работе излучателя. Поэтому одной из основных задач в решении вопроса обогрева открытых площадок горелками инфракрасного излучения является создание горелок, снабженных экраном с максимальной пропускной способностью инфракрасного излучения и защищающим излучающую поверхность от непосредственного обдувания ветром.

К сожалению, до настоящего времени таких горелок еще не создано, и, по нашему мнению, это является первоочередной обязанностью ученых и конструкторов, связанных с разработкой и использованием газовых горелок инфракрасного излучения для обогрева открытых площадок.

Применение газовых горелок инфракрасного излучения для обогрева на открытых площадках, особенно при работе их на сжиженном газе, дает целый ряд преимуществ перед другими видами обогрева, в том числе и с помощью теплушек.

Обогревательные установки с ГИИ позволяют включать их в работу немедленно. Также немедленно может быть произведено и их выключение.

С помощью горелок инфракрасного излучения можно осуществлять обогрев людей непосредственно на рабочем месте, не прерывая производственного и трудового процесса. Это выгодно отличает их от теплушек, обогрев в которых связан с перерывами в работе.

Больше того, если по условиям безопасности (пожаровзрывоопасность) нельзя организовать обогрев непосредственно на рабочем месте, то создается обогревательный пост, оборудованный

инфракрасными горелками. Время и средства, затрачиваемые на создание такого обогревательного поста, во много раз меньше, чем на создание теплушки.

Обогрев в теплушках, связанный с перерывами в работе и с резкими изменениями в тепловом режиме человека, по сравнению с непрерывным обогревом с помощью ГИИ на рабочем месте отрицательно сказывается на самочувствии человека и его производительности труда. Здесь, с одной стороны, нередко преждевременный перерыв в работе, вызванный потребностью согреться, рассеивает внимание и нарушает трудовую сноровку рабочего. С другой стороны, как показывают исследования, процесс согревания в теплушках за счет конвективного обогрева протекает довольно медленно (20—30 мин и более). Кроме того, значительная разница между температурой наружного воздуха и внутри теплушки вызывает неприятное ощущение по выходе из последней и даже нежелание вновь выходить наружу.

Непрерывный (длительный) обогрев горелками инфракрасного излучения непосредственно на рабочем месте, даже менее интенсивный по сравнению с теплушкой, более благоприятно действует на тепловые ощущения человека, поскольку для него в этом случае обеспечивается относительная стабилизация теплового режима.

Обогревательные установки с горелками инфракрасного излучения имеют сравнительно небольшой вес, поэтому они весьма транспортабельны. Они могут быть смонтированы на тележках или на салазках. Это позволяет осуществлять обогрев перемещающихся объектов, а также быстро менять места обогрева.

Горелки инфракрасного излучения позволяют обогревать направленным излучением только те места (участки), которые нас интересуют, например, только человека или его руки, когда ему приходится длительное время держать слишком холодные предметы. Горелками можно подогревать посуду с расплавленным битумом, строительный раствор, стык труб перед сваркой или шов после сварки и т. д.

Поскольку в настоящее время еще нет проверенных данных о дозах облучения людей на открытом воздухе в зависимости от его температуры, скорости ветра, вида одежды, характера выполняемой работы и т. д., можно рекомендовать лишь следующее.

Горелки должны располагаться так, чтобы облучались прежде всего спина и ноги. Конечно, равномерное облучение всей поверхности человека является наилучшим решением обогрева, однако это не всегда возможно выполнить. Вертикальное облучение, создающее максимальную дозу облучения на голову человека, следует считать наихудшим условием обогрева, так как в этом случае возникают резкие температурные (тепловые) перепады между головой и ногами, что отрицательно влияет на тепловое ощущение. Расстояние между горелками и человеком

следует устанавливать по его тепловым ощущениям, учитывая, однако, при этом условия безопасности (ожог, воспламенение одежды, материалов и т. д.).

При интенсивной работе человека или при резком потеплении (облучении солнцем), когда не требуется первоначальная интенсивность облучения, горелки могут быть отодвинуты, повернуты на соответствующий угол или выключены совсем. Таким образом, имеется возможность довольно тонкой регулировки интенсивности облучения, а следовательно и обогрева.

При облучении людей, стоящих непосредственно на земле или на площадках, покрытых снегом, следует принимать меры против увлажнения последних путем предварительного удаления снега или подстилки специальных матов из малотеплопроводных и влагонепроницаемых материалов.

Помимо обеспечения стабильности работы горелок при организации обогрева открытых площадок необходимо также гарантировать минимальное воздействие ветра на обогреваемый объект.

Как известно, с увеличением скорости движения воздуха вблизи обогреваемого предмета происходит отъем тепла от него. В предыдущих разделах уже рассматривался вопрос влияния скорости движения воздуха на тепловые ощущения человека и было показано, что с увеличением этой скорости даже при неизменности температуры окружающего воздуха и дозы облучения происходит охлаждение тела человека и он ощущает холод.

Следовательно, одним из основных условий обеспечения комфорта на открытой площадке, помимо защиты от атмосферных осадков, является устройство ограждений (перегородок, щитов и т. п.), защищающих человека или другой обогреваемый объект от обдувания ветром.

Эти ограждения также должны защищать от обдувания и горелки, если они не имеют специальных ветрозащитных экранов.

Для обеспечения максимальной освещенности обогреваемого участка ограждения должны быть прозрачными (плекстиглаз, стекло).

7. ПРИМЕРЫ ОБОГРЕВА ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДОК И РАБОЧИХ МЕСТ

В зарубежной практике сравнительно широко применяется обогрев людей на открытых площадках, например, на остановках городского транспорта, на тротуарах перед витринами магазинов, на трибунах открытых стадионов и т. д.

В отечественной практике в настоящее время также начинает внедряться обогрев открытых площадок и рабочих мест.

Институтом Мосгазпроект разработаны конструкции обогревательных установок для открытых веранд предприятий общественного питания в виде торшеров (рис. 169). В архитектурно

оформленной тумбочке-подставке помещается баллон сжиженного газа с редуктором. Обогреватель устанавливается в центре обеденного стола, и газовые горелки инфракрасного излучения, укрепленные на концах трубок-стеблей, облучают сидящих за столом людей.

В Москве на одной из улиц устроено открытое кафе. Торговый зал в виде открытой заасфальтированной площадки разме-

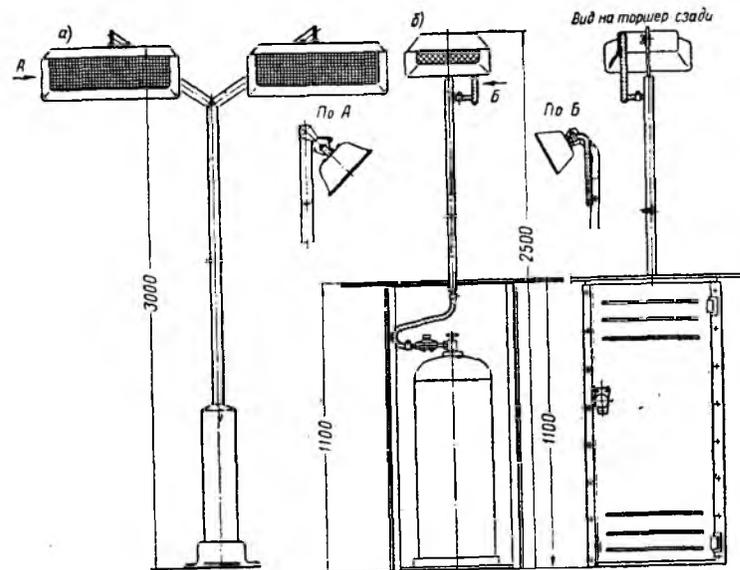


Рис. 169. Обогревательные установки для открытых площадок (веранд) предприятий общественного питания
а — вариант с природным газом; б — вариант с сжиженным газом

ром 9×19 м имеет сверху покрытие из рифленого стеклопластика, укрепленное на металлическом каркасе, опирающемся на стальные стойки из труб. Торговая стойка с производственными отсеками примыкает к торцу площадки.

Площадка облучается газовыми горелками инфракрасного излучения производительностью 2250—2500 ккал/ч каждая. Горелки размещены под навесом на высоте примерно 3 м от пола (на 300—400 мм от покрытия) с наклоном 50—70° к поверхности пола.

Горелки питаются сжиженным газом от групповой газобаллонной установки, расположенной рядом с торговой площадкой в железном шкафу.

Обследование, проведенное лабораторией энергетического использования газа ВНИИГаз данного кафе, показало следующие результаты.

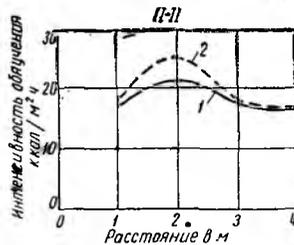
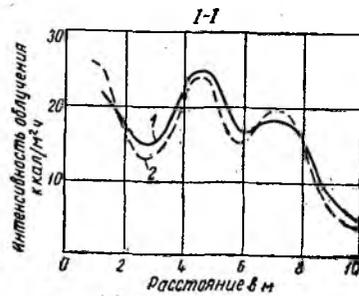
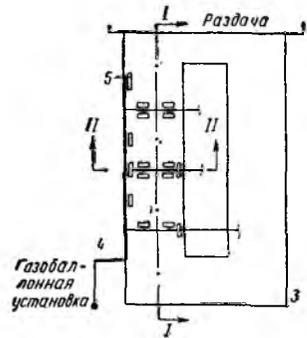


Рис. 170. Суммарная интенсивность облучения в открытом кафе

1 — облучение на уровне стоящего человека; 2 — облучение на уровне сидящего человека; 3 — торговая площадка; 4 — газопровод; 5 — горелки

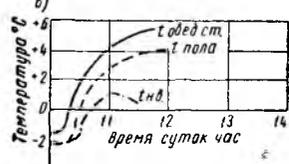
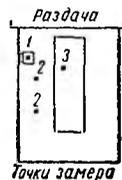
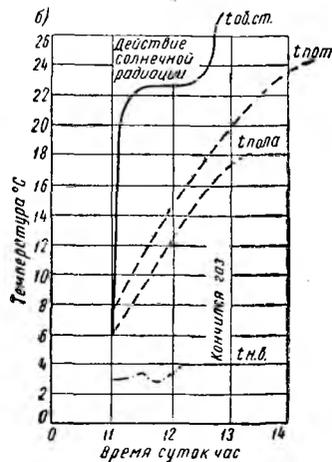
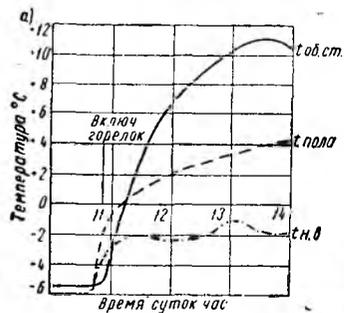


Рис. 171. Температура пола, потолка и обеденных столов в зависимости от температуры наружного воздуха в открытом кафе

а — при $t_n = -6^\circ\text{C}$; б — при $t_n = +3^\circ\text{C}$; в — при $t_n = -2^\circ\text{C}$

1 — точка замера температуры воздуха в зоне обеденного стола; 2 — точка замера температуры поверхности пола; 3 — точка замера температуры наружного воздуха

Максимальная суммарная интенсивность облучения (рис. 170) составляет 25—30 ккал/м²·ч, минимальная — 5—10 ккал/м²·ч.

Максимальная температура поверхности обеденных столиков не превышала 11°С при температуре наружного воздуха -6°C (рис. 171) и 23°С при температуре наружного воздуха $+3^\circ\text{C}$. При этом выявилось, что солнечная радиация значительно влияет на температуру поверхности стола и поднимает ее при этих условиях до 30°С.

Максимальная температура пола не превышала соответственно 4 и 20°С. Температура потолка не превышала 25°С.

Одновременно с этим было установлено, что стабильность температуры поверхности пола, потолка и обеденных столов наступает примерно через 2—3 ч работы горелок.

Температура тыльной части горелки при температуре наружного воздуха -2°C не превышает 80°С.

При данных условиях подавляющее большинство посетителей, сидящих за столиками под горелками, отзывались положительно о своих тепловых ощущениях.

При временном обогреве на открытых площадках могут быть использованы передвижные установки инфракрасного излучения (см. рис. 112 и 113), используемые для сушки штукатурки.

Описанная установка серийно выпускается предприятиями Министерства газовой промышленности СССР и уже широко используется в народном хозяйстве для обогрева сварочных постов, мест изоляции при монтаже наружных трубопроводов, рабочих мест монтажников, каменщиков, штукатуров и т. д. при проведении строительного-монтажных работ на открытых площадках в холодное время года.

Надо полагать, что по мере накопления опыта в разработке и применении горелок инфракрасного излучения для обогрева открытых площадок и рабочих мест, а также расширения их производства будет расширяться и область их применения с одновременным совершенствованием обогревательных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов А. И. Русская отопительно-вентиляционная техника Госстройиздат, 1961.
2. Миссенар А. Лучистое отопление. Госстройиздат, 1961.
3. Оцеп С. А. Лучистое отопление. Госстройиздат, 1948.
4. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. Госэнергоиздат, 1963.
5. Леконт Ж. Инфракрасное излучение. Изд-во физико-математической литературы, 1958.
6. Горомосов М. С., Ципер Н. А. «Водоснабжение и санитарная техника» № 1, 1957.
7. Горомосов М. С., Ципер Н. А. «Гигиена и санитария» № 6, 1957.
8. Ициксон Б. С., Денисов Ю. Л. Газовые инфракрасные излучатели и их использование в народном хозяйстве. «Недра», 1965.

9. Дене З. Инфракрасное излучение. Стройиздат, 1965.
10. Дерибере М. Практика применения инфракрасных лучей. Госэнергоиздат, 1959.
11. Левитин И. Б. Фотография в инфракрасных лучах. Воениздат, 1961.
12. Малышева А. Е. «Гигиена и санитария» № 6, 1957.
13. Бабалов А. Ф. «Водоснабжение и санитарная техника» № 8, 1965.
14. Правовеков К. Н., Маевский М. А., Мирзоян К. В. «Газовая промышленность» № 3, 1965.
15. Краус П., Макглоулин Л., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. Воениздат, 1964.
16. Иванов Ю. А., Тяпкин Б. В. Инфракрасная техника в военном деле. «Советское радио», 1963.
17. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. «Наука», 1964.
18. Зильберберг В. И., Розно Л. И., Гулаев А. И., Цырлин М. И. Комплексная механизация и автоматизация окрасочных работ «Машиностроение», 1965.
19. Майзельс П. Б., Вигдорчик Д. Я. Газогорелочные устройства. Стройиздат, 1964.
20. Стаскевич Н. Л., Майзельс П. Б., Вигдорчик Д. Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. «Недра», 1964.
21. Хольцбехер К. Экономичные методы сжигания газа. Госоптехиздат, 1964.
22. Богомоллов А. И., Тихонов Б. С., Кутник С. Е. Перевод бытовых отопительных и водогрейных приборов на газовое топливо. Стройиздат, 1966.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Инфракрасное излучение и его особенности	5
1. Спектр электромагнитных колебаний	—
2. Тепловое излучение и его основные законы	8
3. Прохождение инфракрасных лучей через оптические материалы и газы	22
Глава II. Газогорелочные устройства инфракрасного излучения	31
1. Особенности сжигания газа в газогорелочных устройствах инфракрасного излучения, спектр и эпюры излучения	—
2. Расчет газогорелочных устройств инфракрасного излучения	45
3. Отечественные и зарубежные конструкции газогорелочных устройств инфракрасного излучения	55
Глава III. Основы применения газогорелочных устройств инфракрасного излучения для тепловой обработки различных материалов и изделий	106
1. Поглощение и отражение инфракрасных лучей	—
2. Глубинное проникновение инфракрасных лучей	110
3. Общие указания по применению газовых излучателей для тепловых процессов	—
4. Общие указания по расчету установок с газовыми инфракрасными излучателями	115
Глава IV. Примеры применения газогорелочных устройств инфракрасного излучения в различных отраслях промышленности	124
1. Общие положения по использованию инфракрасных излучателей для процессов сушки	—
2. Применение инфракрасных излучателей для сушки лакокрасочных покрытий	132
3. Применение инфракрасных излучателей для сушки древесины	160
4. Применение инфракрасных излучателей в керамической промышленности	161
5. Применение инфракрасных излучателей в строительстве	164
6. Применение инфракрасных излучателей для восстановления сыпучести смерзающихся материалов	176
7. Применение инфракрасных излучателей при земляных работах	180

Глава V. Применение горелок инфракрасного излучения для целей отопления и обогрева закрытых и открытых площадок	193
1. Особенности отопления горелками инфракрасного излучения и вытекающие из них требования	—
2. Некоторые особенности расчета систем лучистого отопления	207
3. Особые санитарно-гигиенические условия применения газовых горелок инфракрасного излучения	219
4. Технико-экономические обоснования применения горелок инфракрасного излучения для отопления помещений	221
5. Результаты испытания опытных систем отопления зданий легкого типа горелками инфракрасного излучения	223
6. Особенности обогрева открытых площадок и требования к горелкам	245
7. Примеры обогрева открытых площадок и рабочих мест	248
Литература	251

Богомолов Александр Игнатьевич,
Вигдорчик Дарий Яковлевич,
Маевский Михаил Анатольевич

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
45	Таблица 7, 2 колонка	доля излучаемой энергии в % η	доля излучаемой энергии, η в %
187	Подписочная подпись к рис. 128	1—температура на поверхности грунта; 2—то же на глубине 0,25 м; 3—то же на глубине 5 м.	1—температура на глубине 0,5 м; 2—то же на глубине 0,2 м; 3—температура на поверхности грунта.
194	23 сверху	его тепла	его тела