

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ СОПЕЛ БЕНЗОВОЗДУШНЫХ ГОРЕЛОК

*А. П. Першин*

Высокотемпературная, высокоскоростная газовая струя как носитель энергии находит все более широкое применение для термического бурения скальных пород, разработки мерзлоты, резки бетонов и металла и других новых высокопроизводительных технологических процессов. Наряду с этим большое значение имеет также применение такой струи в качестве источника нагрева при испытании теплозащитных материалов.

Во всех случаях струя получается в результате истечения через сопловой аппарат продуктов сгорания, образующихся в специальной камере сгорания (горелке). Уже сейчас разработано много типов горелок, отличающихся конструкцией, компонентами топлива, диапазоном рабочих режимов. Только в Харьковском авиационном институте в результате научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с 1954 г. создано более 14 различных типов горелок, многие из которых успешно применяются в производстве.

Род технологического процесса, его экономика определяют необходимые значения параметров газовой струи, а следовательно, и тип горелки, компоненты топлива, рабочие режимы.

В таких процессах, как термобурение скальных пород, резка материалов и в процессах, подобных им, основную роль играет тепловое воздействие струи; чисто механическое является второстепенным.

Поэтому наиболее важны тепловые параметры струи. Такими параметрами являются: коэффициент теплоотдачи  $\alpha \left[ \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ час гр}} \right]$  от газа к нагреваемой поверхности, характеризующий интенсивность теплообмена у нагреваемой поверхности; температура газа  $t [^\circ\text{C}]$  у нагреваемой поверхности, а также определяемая этими параметрами величина удельного теплового потока  $q \left[ \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ час}} \right]$ , вводимого в нагреваемое тело.

Научно обоснованное проектирование горелок, способных обеспечить необходимые тепловые параметры струи, выбор рациональных режимов и приемов работы могут базироваться только на достаточно надежных данных по тепловым параметрам струи.

К сожалению, аналитический расчет тепловых параметров струй в настоящее время практически невозможен из-за большой сложности процессов, протекающих при воздействии струи на нагреваемую поверхность, и специфических особенностей, сильно отличающих это

воздействие от уже изученных процессов. Эти особенности следующие.

1. По сравнению с нагреваемым телом струя на выходе из сопла имеет небольшие размеры.
2. Сопловой аппарат может иметь несколько сопел, и отдельные струи взаимодействуют друг с другом у нагреваемой поверхности.
3. Газ в струе может быть сильно диссоциирован, а у поверхности могут протекать химические реакции со значительными тепловыми эффектами.
4. Статическая температура газа может превосходить  $2200^{\circ}\text{K}$ , скорость газа на выходе превышает скорость звука.
5. Процессы теплообмена нестационарны.

Очевидно, для этих условий достаточно надежные данные могут быть получены только из экспериментов; причем способы определения  $\alpha$ ,  $t$ ,  $q$ , требующие измерений в газовой струе, в этих условиях неэффективны или вовсе невозможны.

Параллельно с исследованием тепловых параметров струй кислородных горелок нами ведется исследование тепловых параметров струй бензовоздушных горелок.

Для исследований, проводимых нами с 1954 г., разработана и применяется специальная методика экспериментального определения тепловых параметров струи без прямых измерений в ней.

Для проведения этих исследований нами создан специальный стенд и комплекс измерительных средств [1].

### Краткое описание методики определения тепловых параметров струй

Анализ калориметрических способов определения удельных тепловых потоков показывает, что наряду с трудностью применения в данных условиях эти способы не позволяют без дополнительных измерений в струе определить такие важные тепловые параметры струи, как коэффициент теплоотдачи и температуру воздействующего газа.

В наших опытах применяется нами же разработанная специальная методика определения тепловых параметров струи. Она базируется на некоторых положениях теории регулярного теплового режима и, следовательно, уже в основе своей отражает нестационарность процессов; кроме того, она позволяет из одного опыта без прямых измерений в струе определить мгновенное значение величин  $\alpha$ ,  $t$ ,  $q$  в данном месте нагреваемой поверхности.

Подробное описание этой методики было приведено нами в статьях [2], [3], [4].

Величины  $\alpha$ ,  $t$ , и  $q$  определяются с помощью специальных датчиков, вмонтированных либо в теплоприемник с плоской тепловоспринимающей поверхностью, либо в модель скважины. При определении величин  $\alpha$ ,  $t$ ,  $q$  используется свойство регулярного теплового режима, заключающееся в том, что в этой стадии на температурное поле тела перестает влиять начальное распределение температур. Избыточная температура в любой точке тела  $\vartheta$ , равная разности между температурой воздействующей среды  $t$  и температурой в данной точке тела  $U$ , меняется по закону экспоненты [5]:

$$\vartheta = A U e^{-m\tau}, \quad (1)$$

где  $A$  — величина постоянная, не зависящая от времени и координат. Она характеризует начальное распределение температур в теле.

$U$  — функция только координат, характеризующая пространственное распределение температур в теле.

$\tau$  — любой момент времени при регулярном режиме.  
 $m$  — темп нагрева.

$$m = \left| \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \right| \frac{1}{|\vartheta|}. \quad (2)$$

Темп нагрева как реакция тела на данное тепловое воздействие при данных теплофизических константах материала тела определяется коэффициентом теплоотдачи ( $\alpha$ ) от нагревающего газа к поверхности тела. Поэтому представляется возможным определять  $\alpha$  по измеряемому в эксперименте темпу нагрева датчика  $m$ . У разработанных нами датчиков, выполненных в форме коротких цилиндров, тепловоспринимающей поверхностью служит один торец. Все остальные поверхности теплоизолированы ( $\alpha \rightarrow 0$ ).

Зависимость  $\alpha$  от  $m$  мы определили, решая уравнение Фурье для датчика:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \vartheta,$$

где  $a$  — температуропроводность материала датчика.

Полученная нами зависимость имеет следующий вид:

$$\alpha = \lambda \sqrt{\frac{m}{a}} \operatorname{tg} \left( \delta \sqrt{\frac{m}{a}} \right). \quad (3)$$

Здесь  $\lambda$  — теплопроводность материала датчика,  
 $\delta$  — высота датчика.

Темп нагрева  $m$  определяется в эксперименте следующим образом.

При разогреве датчика ведется запись изменения температуры во времени в двух точках датчика, либо в одной. Для первого случая получили следующую формулу:

$$m = \frac{\ln(U_2 - u_1)_{\text{I}} - \ln(u - U_1)_{\text{II}}}{\tau_{\text{II}} - \tau_{\text{I}}}, \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{II}}$  и  $\tau_{\text{I}}$  — любые отрезки времени при регулярном режиме. Если ведется запись изменения температуры в одной точке датчика, то  $m$  определяем по формуле

$$m = \frac{\ln b}{\Delta \tau}, \quad (5)$$

где  $b = \frac{\Delta u_{\text{I-II}}}{\Delta u_{\text{II-III}}}$ , а

$$\Delta \tau = \Delta \tau_{\text{I-II}} = \tau_{\text{I}} - \tau_{\text{II}} = \Delta \tau_{\text{II-III}} = \tau_{\text{II}} - \tau_{\text{III}}.$$

Постоянство величины  $b$  при разогреве служит критерием качества регуляризации процесса разогрева.

Для определения температуры воздействующего газа получена такая формула.

$$t = \frac{u_{\text{I}} u_{\text{III}} - u_{\text{II}}^2}{u_{\text{I}} + u_{\text{III}} - 2u_{\text{II}}}. \quad (6)$$

где  $u_{\text{I}}$ ,  $u_{\text{II}}$ ,  $u_{\text{III}}$  — значения температуры в точке  $M$  датчика, где термомпара вмонтирована в моменты времени, взятые через разные интервалы на кривой нагрева датчика  $u = u(\tau)$ .

Возможно также графическое определение  $t$  и  $m$  по кривой  $u=u(\tau)$ . Температуру на поверхности датчика в любой момент времени определяем по формуле:

$$\vartheta_s = \frac{(t - u_M) \cos\left(\delta \sqrt{\frac{m}{a}}\right)}{\cos\left(x \sqrt{\frac{m}{a}}\right)}, \quad (7)$$

где  $u_M$  — температура в точке  $M$  датчика, где вмонтирована термопара.

$x$  — расстояние от нижнего торца датчика до точки  $M$ .

Для удельного теплотока ( $q$ ) в любой момент времени мы получили такое выражение:

$$q = \lambda \sqrt{\frac{m}{a}} \frac{\sin\left(\delta \sqrt{\frac{m}{a}}\right)}{\cos\left(x \sqrt{\frac{m}{a}}\right)} (t - u_M). \quad (8)$$

На базе специальных исследований датчиков [4] и предварительных испытаний для определения тепловых параметров струй бензовоздушных горелок нами был выбран медный датчик с диаметром, равным высоте (16 мм).

В датчик монтировалась хромель-алюмелевая термопара в алундовой изоляции. Запись изменения температуры в датчике со временем велась с помощью осциллографа Н-700.

#### Установка для экспериментального исследования тепловых параметров бензовоздушных горелок

Эта установка является частью специального стенда, предназначенного для исследования процессов, протекающих при высокоинтенсивном нагреве [1].

На рис. 1 представлена схема установки.

Установка включает системы питания горелки 20 горючим и воздухом, а также системы замеров и устройств, обеспечивающие проведение эксперимента.

Горючее подается путем вытеснения сжатым воздухом, поступающим в бак горючего 12 из баллона 14 через редуктор 13. Для измерения расхода горючего в магистрали вмонтирована трубка Вентури 10, соединенная с дифференциальным манометром 11. Регулирование расхода горючего производится с помощью дроссельного крана 9.

Воздух к горелке подводится от компрессора. Для измерения его расхода в магистрали имеется трубка Вентури 3, соединенная с дифманометром 2. Необходимые при этом измерения давления и температуры воздуха производятся соответственно с помощью образцового манометра 23 и термопары 5. Регулирование расхода воздуха производится с помощью дроссельного крана 4.

Для контроля режима работы горелки предусмотрены образцовые манометры 15, 16, и 22 соответственно измеряющие: давление горючего перед форсункой горелки, давление сгорания и давление воздуха непосредственно перед горелкой.

Исследуемая горелка укреплена в направляющих 18 специального станка и с помощью винтовой пары 8 может устанавливаться на различных расстояниях от рабочей поверхности теплоприемника 19,

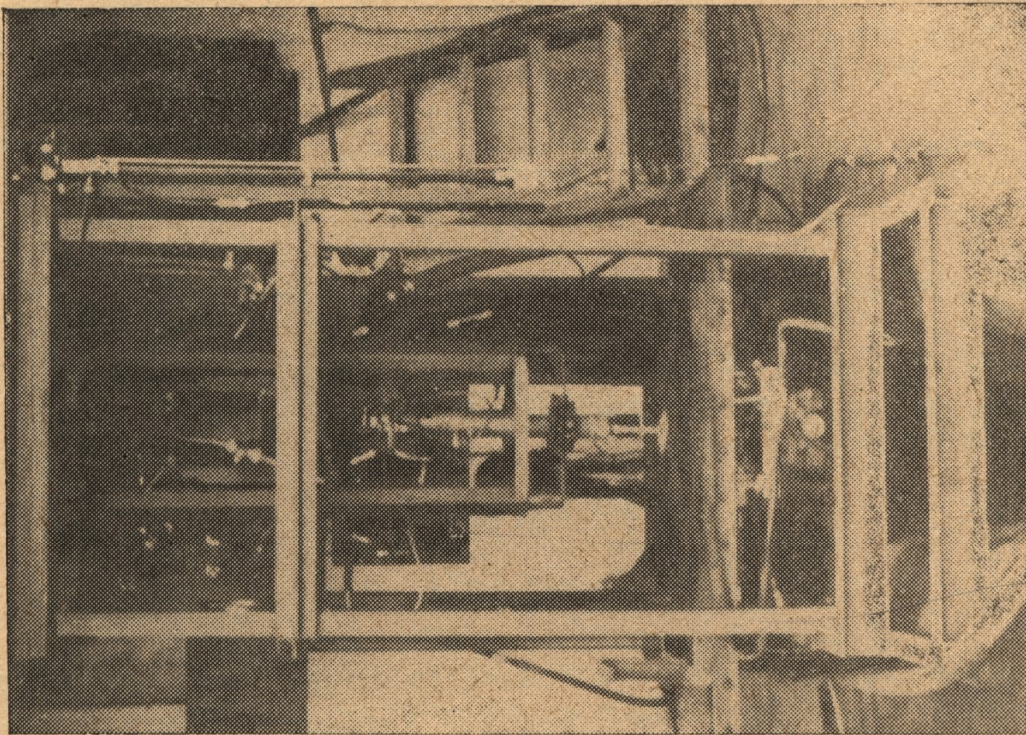


Рис. 2. Общий вид станка с работающей горелкой. (Теплоприемник закрыт заслонкой).

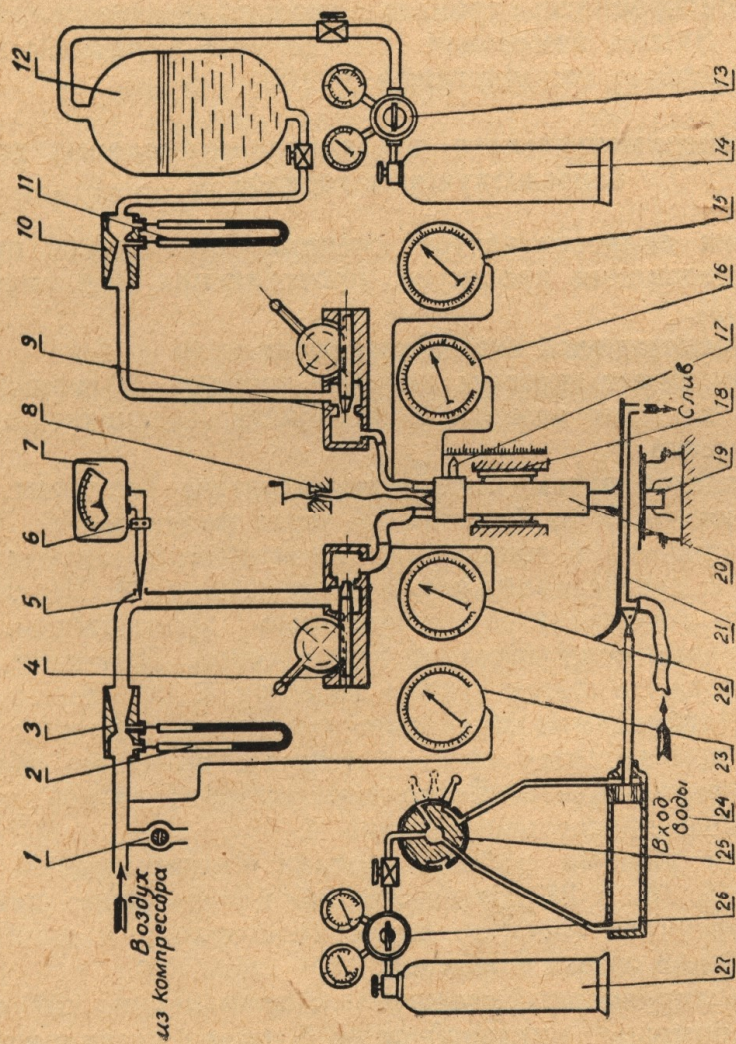


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования тепловых параметров струй бензовоздушных горелок.

При работе горелки на переходных режимах запуска теплоприемник защищен от действия струи горелки заслонкой 21, которая охлаждается проточной водой и связана со штоком поршня пневмоцилиндра 24.

Управление заслонкой производится дистанционно с помощью трехходового крана 25.

Общий вид станка с установленной в нем горелкой представлен на рис. 2.

### Проведение экспериментов

В экспериментах изучалось влияние на тепловые параметры струй бензовоздушных горелок следующих факторов: коэффициента избытка воздуха ( $\alpha_T$ ), давления сгорания, расстояния до нагреваемой поверхности, размеров и типа сопла.

Изучалось также распределение тепловых параметров струи по плоской нагреваемой поверхности.

Во всех опытах, кроме записи процесса разогрева датчика, производились следующие измерения: давления сгорания, расходов воздуха и горючего, расстояния от сопла до нагреваемой поверхности и от оси струи до оси датчика (когда изучалось распределение тепловых параметров по нагреваемой поверхности).

Установка датчика строго по центру струи производилась следующим образом. На теплоприемник накладывался специальный диск-накладка, точно устанавливаемый относительно центра датчика по центровочному бурту теплоприемника. В диске-накладке заподлицо с поверхностью сделаны 4 отверстия для отбора давления, расположенные на равных расстояниях от центра и попарно соединенные с дифференциальными манометрами. При установке диска в горелку подается только воздух. Так как теплоприемник укреплен на координатном устройстве, можно путем его перемещения добиться установления нулевых перепадов на обоих дифманометрах. Это свидетельствует о том, что воздействие струи симметрично относительно оси датчика. После этого фиксируют теплоприемник и, сняв диск, приступают к огневому эксперименту.

При исследовании влияния коэффициента избытка воздуха изменение его производилось одновременным изменением расхода горючего и воздуха и охватывало весь диапазон возможных режимов горелки, который ограничивался возможностью ее устойчивой работы.

При исследовании влияния давления сгорания производились измерения для серии  $\alpha_T$ . Давление изменялось от 2 *ати* до 6 *ати*, т. е. был охвачен весь диапазон горелки по давлению, ограничиваемый напорностью компрессора, с которым работает горелка. Такие серии опытов проводились для различных сопел.

При исследовании влияния расстояния до нагреваемой поверхности горелка фиксировалась в различных положениях в диапазоне от 90 до 200 *мм*.

В процессе исследования постоянными поддерживались: давление сгорания, суммарный расход компонентов топлива и их соотношение.

Контроль постоянства этих величин мы свели к контролю постоянства давления сгорания и расхода горючего.

При исследовании распределения тепловых параметров по нагреваемой поверхности опыты проводились аналогично опытам по исследованию расстояния. Измерение тепловых параметров производи-

лось в точках, удаленных от оси датчика не более 70 мм, так как далее они изменялись незначительно.

В опытах применялась горелка типа РТБВ (рис. 3) [6]. При обработке опытов температура газа  $t$  определялась по формуле (6) и графически. Темп нагрева определяли графически, подсчет  $\alpha$  вели по формуле (3), а значение удельного теплового потока вычисляли для начала нагрева ( $q_0$ ), так как именно эти значения представляют инте-

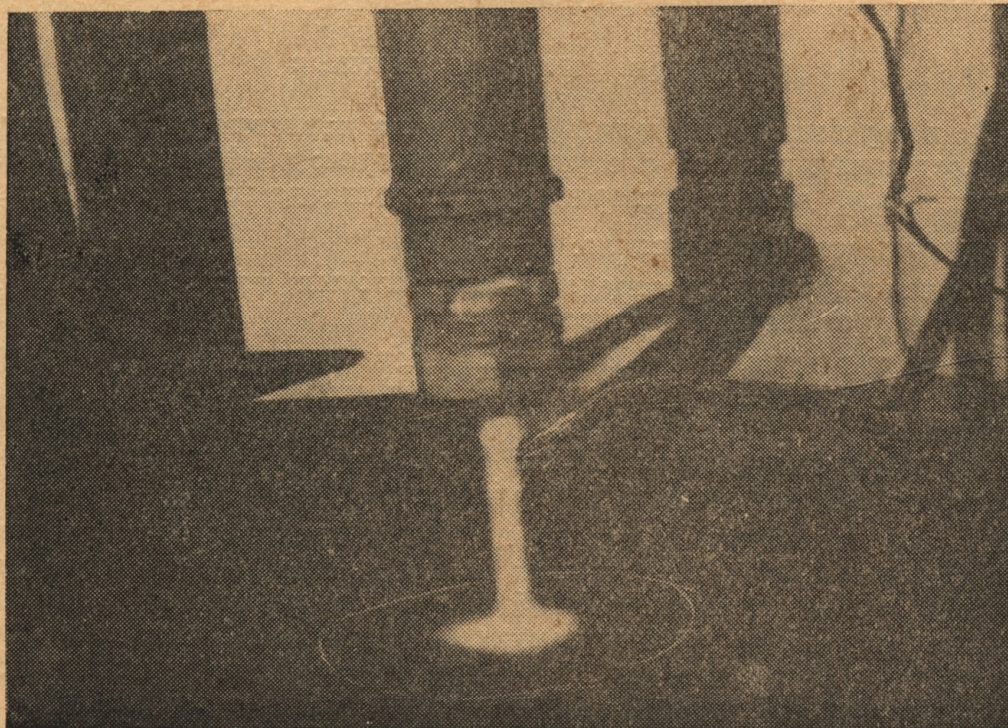


Рис. 3. Проведение опыта. Струя горелки воздействует на датчик.

рес при оценке возможностей струи применительно к термическому бурению. Это соответствует моменту, когда температура поверхности мала по сравнению с температурой газа. Тогда:

$$q_0 = \alpha t.$$

#### Результаты экспериментального исследования тепловых параметров струй бензовоздушных горелок

Наиболее характерные зависимости, полученные в опытах, графически представлены на рис. 4, 5, 6, 7.

Как видно из рис. 4, 5, изменение соотношения компонентов топлива ( $\alpha_T$ ) приводит к значительному изменению тепловых параметров струи.

Максимально возможный удельный теплоток  $q_0$  и температура газа у поверхности  $t$  в диапазоне изменения  $\alpha_T$  от 1 до 4,9 с ростом  $\alpha_T$  непрерывно уменьшаются. При этом общее изменение  $q_0$  составляет примерно от 4 до 1,2 млн  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час}}$ . В этом диапазоне изменения  $\alpha_T$  изменение  $q_0$  близко к линейному. Как видно из рис. 4, с уменьшением  $\alpha_T$  влияние давления сгорания уменьшается.

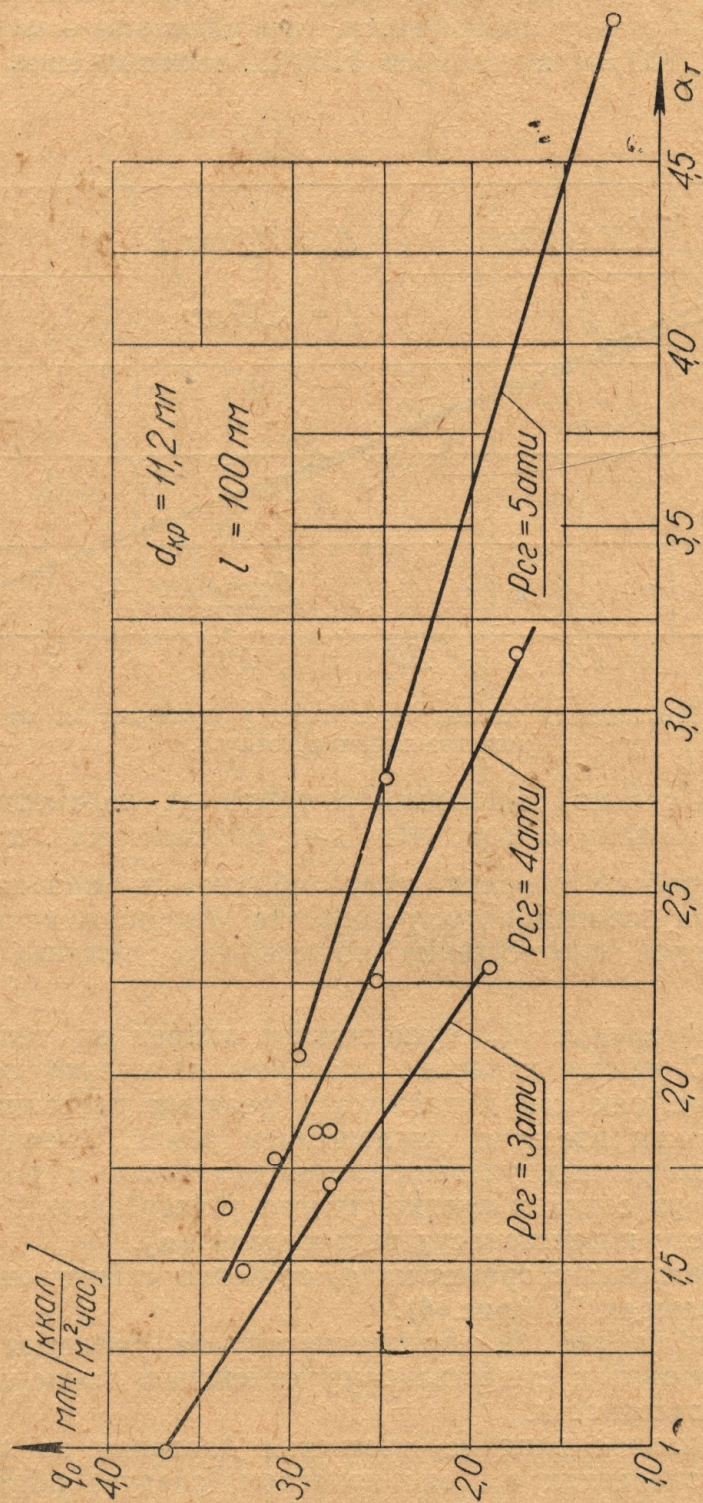


Рис. 4. Зависимость удельного теплотока от коэффициента избытка воздуха.



Сильное влияние  $\alpha_T$  на  $q_0$  можно объяснить тем, что с ростом  $\alpha_T$  уменьшается температура газа у поверхности  $t$  (рис. 5) из-за уменьшения температуры сгорания. Как показали опыты, изменение интенсивности теплоотдачи при этом незначительно и в некоторой степени компенсируется изменением расхода компонентов топлива.

Температура газа у поверхности, при удалении сопла горелки от поверхности  $l < 100$  мм, превышает  $1200^\circ\text{C}$ , если значение  $\alpha_T$  близко 1.

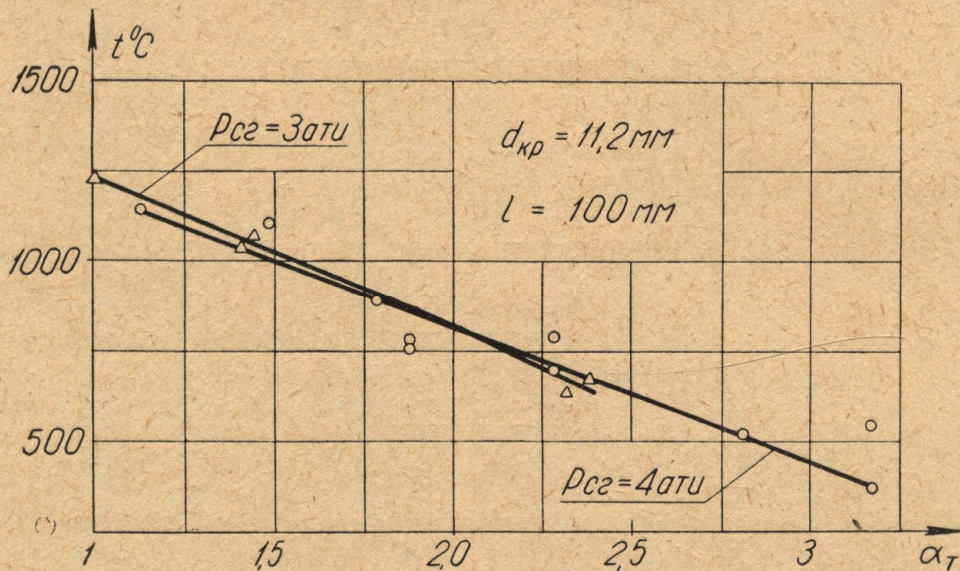


Рис. 5. Зависимость температуры газа у поверхности от коэффициента избытка воздуха.

Выявление сильной зависимости тепловых параметров струи от  $\alpha_T$  приводит к выводу о том, что для обеспечения их стабильных значений при работе горелки целесообразно применение в системе питания горелки специального устройства, автоматически поддерживающего заданное соотношение компонентов топлива (стабилизатора  $\alpha_T$ ).

Давление сгорания  $P_{сг}$  существенно влияет на тепловые параметры струи. С ростом давления сгорания несколько растет температура сгорания, так как подавляются реакции диссоциации, характеризующиеся, как известно, поглощением тепла. Увеличение давления при прочих равных условиях приводит также к росту скорости истечения газа из сопла и плотности газа у нагреваемой поверхности, значит, и к росту интенсивности теплоотдачи ( $\alpha$ ).

Влияние давления сгорания на  $q_0$  особенно существенно при  $\alpha_T$ , значительно больших 1,5 (рис. 4).

Как видно из рис. 5, влияние изменения давления в пределах 1—2 ат не приводит к существенному изменению температуры газа у нагреваемой поверхности.

Поэтому сильное влияние изменения давления на изменение  $q_0$  при больших значениях  $\alpha_T$ , мы полагаем, следует объяснить влиянием давления на интенсивность теплоотдачи к поверхности.

Тепловые параметры струи резко изменяются при изменении расстояния между соплом и нагреваемой поверхностью ( $l$ ).

При увеличении  $l$  значение  $q_0$  и других тепловых параметров струи непрерывно уменьшается из-за рассеяния энергии струи при движении ее за соплом.

На рис. 6 приведено типичное изменение  $q_0$  при изменении  $l$  для ряда  $\alpha_T$ . В качестве примера взяты результаты опытов, проведенных на сопле с  $d_{кр} = 11,2$  мм при давлении сгорания, равном 4 ат. Для этого случая при всех  $\alpha_T$  увеличение  $l$  вдвое приводит к уменьшению  $q_0$  более чем в 2,5 раза. С увеличением расстояния уменьшается влияние соотношения компонентов.

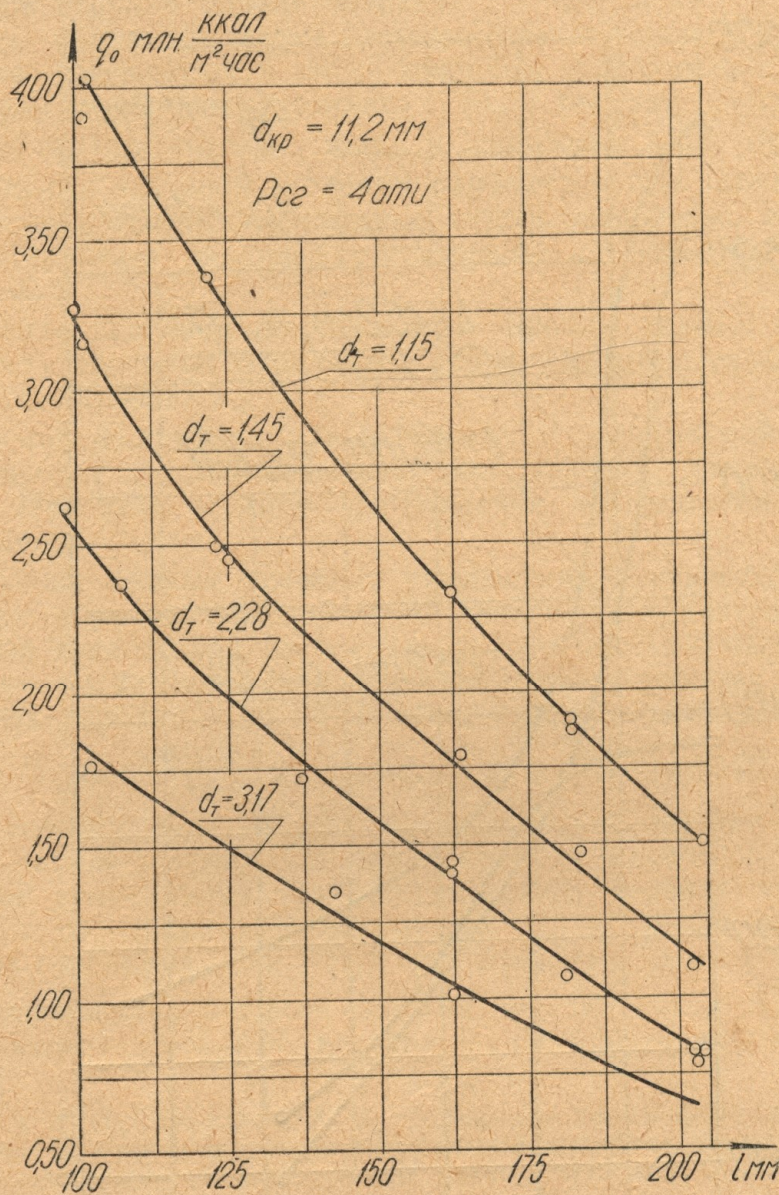


Рис. 6. Зависимость удельного теплотока от расстояния между соплом горелки и нагреваемой поверхностью.

Влияние расстояния  $l$  на тепловые параметры горелки обязательно должно учитываться при назначении режимов работы горелки и технологии бурения.

В опытах было установлено, что при прочих равных условиях уменьшение диаметра критического сечения сопла приводит к уменьшению значений тепловых параметров струи. Это объясняется тем, что с уменьшением диаметра струи доля потерь энергии из-за рассеяния в окружающую среду увеличивается.

Как показали опыты, тепловое воздействие струи по плоской нагреваемой поверхности распределяется весьма неравномерно. В качестве примера приводим распределение температуры газа  $t$  у нагреваемой поверхности (рис. 7). Таким же образом изменяется интенсивность теплоотдачи ( $\alpha$ ). Значения тепловых параметров уменьшаются с удалением от оси струи. Наиболее резкое изменение тепловых па-

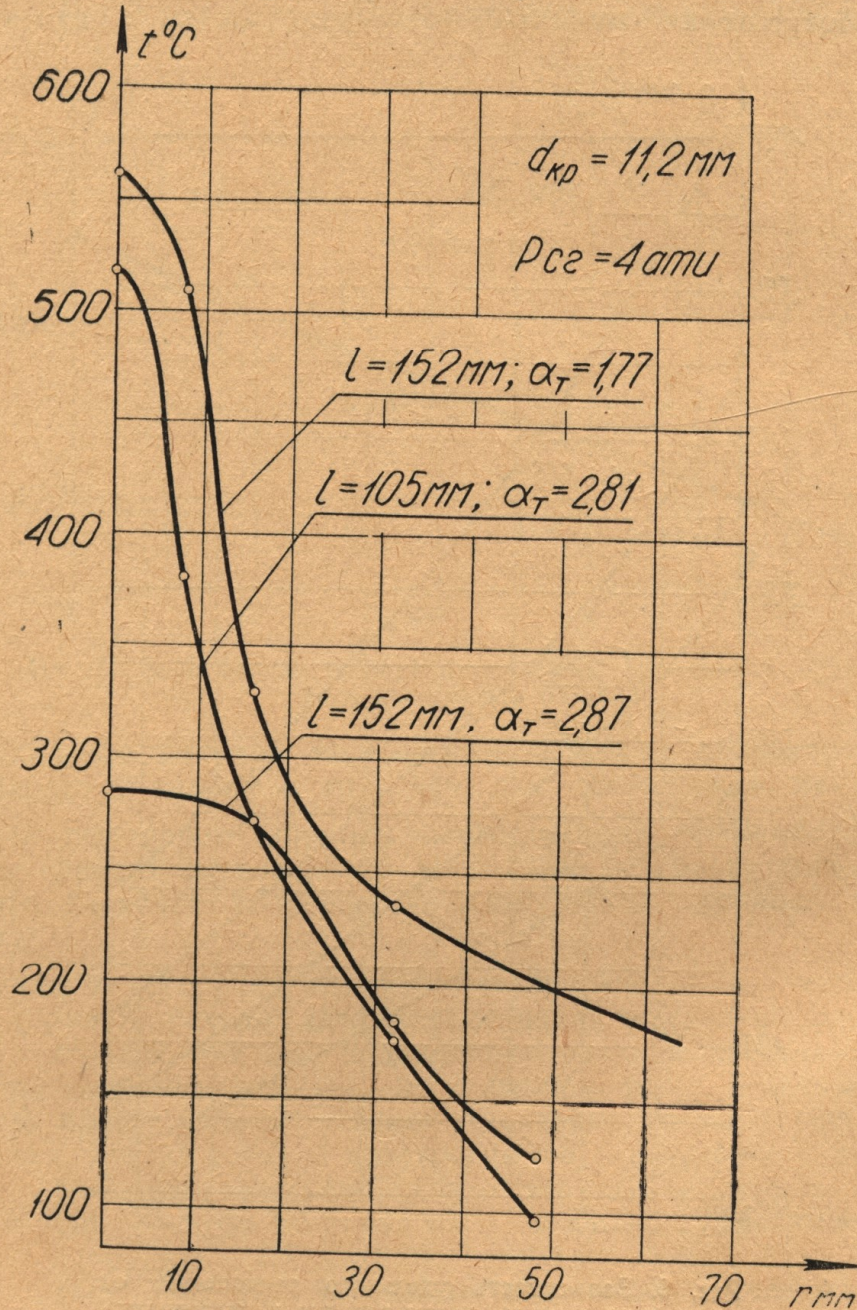


Рис. 7. Распределение температуры газа у нагреваемой поверхности.

раметров наблюдается на расстояниях от оси струи, не превосходящих 20–30 мм.

Для возможных режимов работы горелок типа РТБВ область плоской нагреваемой поверхности, где  $q_0 > 3 \text{ млн} \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$ , ограничена кругом с диаметром не более 20–30 мм. С увеличением расстояния до нагреваемой поверхности неравномерность распределения параметров уменьшается, их значения при этом также уменьшаются.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанный метод и комплекс измерительных средств для определения тепловых параметров струи, базирующийся на теории теплового регулярного режима, позволяют из одного опыта без прямых измерений в струе. определить местное значение тепловых параметров в любой момент нагрева.

Особый интерес для оценки тепловых возможностей струй горелок для термического разрушения представляет определение тепловых параметров струи в начале нагрева.

2. Тепловые параметры струй бензовоздушных горелок, в отличие от кислородных, изменяются в очень широких пределах при изменении соотношения компонентов топлива ( $\alpha_T$ ), так как диапазон рабочих значений ( $\alpha_T$ ) значительно шире и составляет 1÷5. Для обеспечения стабильных значений тепловых параметров при работе горелки целесообразно в систему ее питания ввести устройство, автоматически поддерживающее заданное соотношение компонентов топлива (стабилизатор  $\alpha_T$ ).

3. Увеличение давления сгорания при прочих равных условиях приводит к росту тепловых параметров струи. Особенно сильно влияние давления на больших  $\alpha_T$ .

4. Увеличение расстояния между соплом и нагреваемой поверхностью ( $l$ ) приводит к резкому уменьшению значений тепловых параметров струи. При этом влияние соотношения компонентов топлива ( $\alpha_T$ ) уменьшается.

5. При прочих равных условиях уменьшение критического сечения сопла ведет к уменьшению значений тепловых параметров струи.

6. Тепловое воздействие распределяется по плоской нагреваемой поверхности весьма неравномерно. Для возможных рабочих режимов бензовоздушных горелок типа РТБВ зона, где  $q_0$  может иметь значение больше  $3 \text{ млн } \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$  по диаметру не превышает 20÷30 мм.

7. Струя горелки типа РТБВ обеспечивает достаточно высокое значение  $q_0$  в начале нагрева. По мере разогрева поверхности удельный теплоток уменьшается. Для эффективного бурения этими горелками необходим «запас по температуре». Для бурения некоторых пород гранитов горелками типа РТБВ это возможно при ( $\alpha_T$ ), близких 1, что подтверждено нашими опытами бурения гранитов в лабораторных условиях и в условиях карьера (г. Днепродзержинск).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голдаев И. П., Першин А. П. Стенд для экспериментальных исследований процессов, протекающих при высокоинтенсивном нагреве, регистрация Комитета по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР, № 25448 от 15 сентября 1961 года.
2. Першин А. П. О тепловой эффективности газовых струй при термическом бурении. Сб. научн. тр. МГИ, № 24. Горный журнал, М., 1958.
3. Першин А. П. К экспериментальному изучению тепловой эффективности газовых струй горелок для термического бурения, Изв. высших учебных заведений, Горный журнал, № 6, Свердловск, 1960.
4. Першин А. П. Определение локальных значений коэффициентов теплоотдачи и теплоток в условиях теплообмена высокой интенсивности, Изв. высших учебных заведений, Приборостроение, том IV, № 3, Институт точной механики и оптики, Ленинград, 1961.
5. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим, Гостехтеориздат, 1954.
6. Голдаев И. Г. Полевичек Е. П., Попов Н. Н., Моторненко А. П., Серогодский А. В. Разработка мерзлых грунтов термическим способом, Госгортехиздат, 1960.