

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

Н. В. Овсянник, Е. Н. Волкова, А. А. Нижников

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА И СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

**по одноименному курсу для студентов специальности
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2010

УДК 662.741.334(075.8)
ББК 31.35я73
О-34

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 9 от 01.06.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
Ю. А. Рудченко

- Овсянник, Н. В.**
О-34 Горение топлива и снижение вредных выбросов : лаборатор. практикум по одному курсу для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» днев. и заоч. форм обучения / Н. В. Овсянник, Е. Н. Волкова, А. А. Нижников. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 22 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены краткие теоретические сведения и порядок выполнения лабораторных работ по следующим темам: определение времени прогрева и выгорания капель жидкого топлива; определение влияния коэффициента избытка воздуха на содержание в продуктах сгорания трехатомных газов; определение влияния различных факторов на содержание оксидов серы в продуктах сгорания топлива; определение устойчивого режима работы горелки, предназначенной для сжигания газа.

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения.

УДК 662.741.334(075.8)
ББК 31.35я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2010

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОГРЕВА КАПЕЛЬ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Цель работы: определить время прогрева холодных капель с $T_0 = 20^\circ\text{C}$ соляного масла до достижения на их поверхности температуры кипения.

Теоретическая часть

Для расчета времени прогрева капли топлива от холодного состояния до температуры кипения можно воспользоваться критерием нестационарного теплообмена Био:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot (\delta / 2)}{\lambda_{\text{ж}}} = \frac{Nu}{2} \cdot \frac{\lambda_{\text{г}}}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad (1.1)$$

где Nu – критерий теплообмена от газов к капле топлива (при малых скоростях обтекания капли или когда капли движутся вместе с потоком $Nu = 2$);

$\lambda_{\text{г}}, \lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности газов и жидкого топлива;

δ – диаметр капли, м;

Для нестационарного теплообмена при $Bi \leq 1,0$ и одинаковой температуре во всех точках шара:

$$\tau = \frac{(\delta / 2)^2}{3 \cdot Bi \cdot a_{\text{ж}}} \ln \frac{i_0}{i}, \quad (1.2)$$

где $a_{\text{ж}} = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{c_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}}}$ – коэффициент температуропроводности жидкости;

$$i_0 = T_{\text{ср}} - T_0; \quad i = T_{\text{ср}} - T;$$

T и T_0 – конечная и начальная температуры капли топлива;

$T_{\text{ср}}$ – температура греющей среды.

Уравнение баланса массы для испаряющейся и горячей по диффузионному горению капли:

$$d\left(c_{\text{ж}} \cdot \frac{\rho \cdot d^3}{6}\right) = -\rho \cdot d^2 \cdot q_{\text{п}} d\phi \quad (1.3)$$

где $q_{\text{п}}$ – удельный поток паров от капли в газовый поток;

$c_{\text{ж}}$ – плотность жидкости;

τ – время протекания процесса.

При переходе от плоской задачи к сферической следует принять $D/d = 1/\text{Nu}$.

По закону Срезневского:

$$d^2 = d_0^2 - k\phi, \quad (1.4)$$

где d_0 – начальный диаметр капли;

Коэффициент горения:

$$k = \left(\frac{4}{c_{\text{ж}}}\right) \text{Nu} \Phi(T_{\text{г}}, T_{\text{кип}}), \quad (1.5)$$

$$\Phi(T_{\text{г}}, T_{\text{кип}}) = \frac{\lambda}{c_{\text{рп}}} \cdot \ln \frac{\frac{r}{c_{\text{рп}}} + (T_{\text{г}} - T_{\text{кип}})}{\frac{r}{c_{\text{рп}}}}, \quad (1.6)$$

где $c_{\text{рп}}$ – теплоёмкость паров топлива, кДж/(кг·°С),

r – теплота парообразования топлива, кДж/кг.

Полученные формулы относятся к случаю сравнения больших скоростей обтекания капель потоком и для расчета горения капель в неподвижной среде, когда $\text{Nu} \rightarrow 2$.

При горении крупных капель при обтекании их потоком с относительными их скоростями $\text{Nu} \approx 2,5$ (при относительных скоростях около 1 м/с, как в топках котлов).

По вышеуказанным формулам можно произвести расчет испарения капли негорючей жидкости (или горючей жидкости, но без воспламенения), если задана температура среды $T_{\text{ср}}$.

В случае многофункциональных топлив при горении капель не происходит разгона фракций, так как скорость перемешивания внутри капли гораздо меньше скорости испарения.

Ход работы

Определить время прогрева холодных капель с $T_0 = 20^\circ\text{C}$ солярового масла до достижения на их поверхности температуры кипения $T = 200^\circ\text{C}$.

Исходные данные

$\delta = 0,01; 0,1; 1,0; 2,0$ мм – диаметр капель;
 $\rho_{\text{ж}} = 900$ кг/м³ – плотность солярового масла;
 $\lambda_{\text{ж}} = 0,1163$ Вт/(м·°C) – теплопроводность топлива;
 $c_{\text{ж}} = 2,093$ кДж/(кг·°C) – теплоемкость топлива;
 $\lambda_{\text{г}} = 0,0698$ Вт/(м·°C) – теплопроводность газов;
 $T_{\text{ср}} = 1200$ °C – температура газов.

1. По формуле (1.1) подставляя $\lambda_{\text{г}}$, $\lambda_{\text{ж}}$ и $Nu = 2$, найти Bi .
2. По формуле (1.2) для различных δ определить τ , найдя предварительно $a_{\text{ж}} = 0,62$ мм²/с

Таблица 1.1

δ , мм	0,01	0,1	1,0	2,0
τ , сек				

3. В результате выполнения работы необходимо построить графическую зависимость влияния размера капель на время прогрева капель до температуры кипения $\tau = f(\delta)$ и сделать соответствующие выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие определяемые критерии характеризуют процесс подогрева капель жидкости?
2. Определение времени прогрева капли жидкого топлива.
3. Определение коэффициента горения.
4. Как влияет размер капель на время прогрева капель до температуры кипения?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫГОРАНИЯ КАПЕЛЬ МАЗУТА В ФАКЕЛЕ ПРЯМОТОЧНОЙ ГОРЕЛКИ

Цель работы: определить время выгорания капель мазута диаметром $\delta_0 = 0,25; 0,5; 1,5; 2,0; 2,5$ мм в факеле прямооточной горелки.

Теоретическая часть

Аналитическое рассмотрение процесса горения капли жидкого топлива основывается на учёте взаимного влияния факторов, определяющих химическую кинетику, тепломассообмен, испарение и другие явления, сопровождающие горение и обусловленные им.

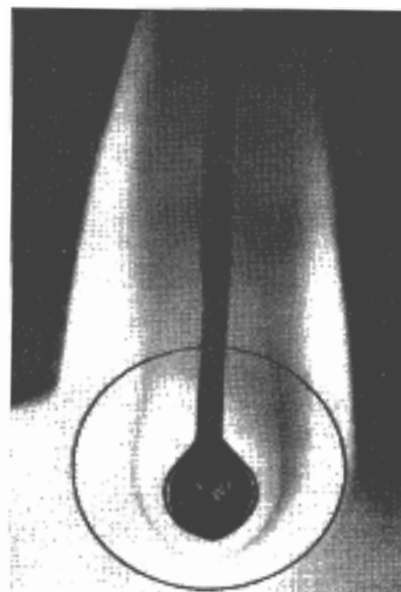
Теория диффузионного горения одиночной капли топлива была впервые создана Г.А.Варшавским в 1945 году. Основу диффузионной теории составляют следующие предпосылки:

1. Процесс рассматривается как квазистационарный. Это значит, что не учитывается изменение полей температур и концентраций компонент газовой среды по мере выгорания капли.

2. Предполагается, что кинетическое сопротивление горению ничтожно по сравнению с диффузионным, т.е. скорость химического превращения намного больше скорости подвода компонентов реакции к зоне горения.

Факел представляет собой стационарное пламя правильной формы, возникающее в струе горючей смеси. В данном случае имеет место диффузионное горение, т.е. факел образуется при истечении топлива в среду окислителя (или окислителя в среду топлива, горючего) и называется диффузионным факелом.

3. Капля жидкого топлива окружена атмосферой, насыщенной парами этого горючего. Вблизи от капли по сферической поверхности устанавливается зона горения, диаметр которого получается в 1-5 раз больше размера капли.



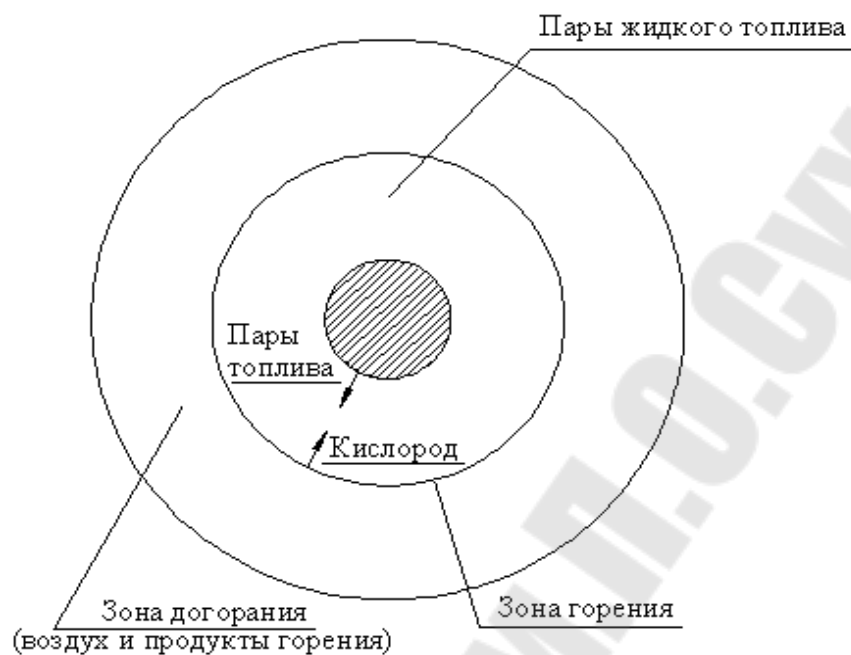


Рис. 2.1. Схема горения капли жидкого топлива

Химическое реагирование смеси паров жидкого топлива с окислителем происходит весьма быстро, поэтому зона горения весьма тонка.

Скорость горения определяется наиболее медленной стадией процесса – скоростью испарения горючего. Испарение капли протекает за счет теплоты излучения из зоны горения. В пространстве между каплей и зоной горения находятся пары жидкого топлива и продукты горения, в пространстве вне зоны горения – воздух и продукты горения. В зону горения изнутри диффундируют пары топлива, а снаружи кислород. Здесь эти компоненты вступают в химическую реакцию, которая сопровождается выделением теплоты и образованием продуктов сгорания. Из зоны горения теплота переносится наружу и к капле, а продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство между каплей и зоной горения. По мере выгорания капли из-за уменьшения поверхности общее испарение уменьшается, зона горения суживается и исчезает при полном выгорании капли.

Интенсивность тепло- и массообмена зависит от турбулентности потока и размера капель. Крупные капли из-за более высоких относительных скоростей горят быстрее, чем в какой-то степени компенсируется неравномерность распыливания.

Время прогрева капли значительно меньше времени испарения.

Ход работы

Исходные данные:

$T_{\Gamma} = 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура газа в зоне горения капли;

$T_{\text{кип}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура кипения мазута;

$\lambda = 8,72 \cdot 10^{-2}$ – коэффициент теплопроводности;

$r = 218 \text{ кДж/кг}$ – теплота парообразования мазута;

$c_{\text{рп}} = 2,09 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C)}$ – теплоёмкость паров мазута;

$c_{\text{м}} = 950 \text{ кг/м}^3$ – плотность мазута.

1. Функция:

$$\Phi(T_{\Gamma}, T_{\text{кип}}) = \frac{\lambda}{c_{\text{рп}}} \cdot \ln \frac{\frac{r}{c_{\text{рп}}} + (T_{\Gamma} - T_{\text{кип}})}{\frac{r}{c_{\text{рп}}}}, \text{ кг/(м}\cdot\text{ч)} \quad (2.1)$$

Критерий теплообмена от потока к капле при движении капли со скоростью воздуха и других газов с избыточным кислородом (в неподвижной среде) $\text{Nu}=2$.

2. Коэффициент горения по формуле Срезневского:

$$k = \left(\frac{4}{c_{\text{ж}}} \right) \text{Nu} \Phi(T_{\Gamma}, T_{\text{кип}}), \text{ м}^2/\text{ч (мм}^2/\text{с)} \quad (2.2)$$

3. Время выгорания капли определяем из соотношения:

$$\phi = \frac{D_0^2}{k}, \text{ сек} \quad (2.3)$$

Результаты вычисления свести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№	Значение функции $\Phi(T_{\text{г}}, T_{\text{кип}})$, кг/(м·ч)	Коэффициент горения, k , мм ² /с	Диаметр капли, δ_0 , мм	Время выгорания, τ , сек
1				
2				
3				
4				
5				

4. Построить графическую зависимость, связывающую размер частиц и время выгорания в факеле прямоточной горелки и сделать соответствующий вывод о влиянии размера капли на время выгорания.

Контрольные вопросы

1. Что является факелом горения?
2. Физико-химические основы процесса горения жидкого топлива в топке.
3. Определение времени выгорания капли жидкого топлива.
4. Как влияет размер капель на время выгорания в факеле прямоточной горелки?

Лабораторная работа №3

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА СОДЕРЖАНИЕ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ТРЕХАТОМНЫХ ГАЗОВ

Цель работы: произвести расчет коэффициента избытка воздуха для случаев сжигания различного топлива и установить зависимость коэффициента избытка воздуха на RO_x в продуктах сгорания топлива.

Теоретическая часть

В общем случае в топке котла газообразные продукты сгорания, представляемые суммой объемов отдельных газов на единицу количества топлива, могут содержать:

$$V_r = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{CO} + V_{H_2O} + \sum V_{C_mH_n} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2} \quad (3.1)$$

В выражение (3.1) входят продукты полного (CO_2 , SO_2 , H_2O) и неполного (CO , H_2 , C_mH_n) сгорания топлива, а также избыточный воздух (O_2 , N_2). При осуществлении топочного процесса в отличие от процесса газификации топлива, в процессе сгорания можно получить максимальное количество продуктов полного сгорания.

При $b=1$ и полном сгорании топлива газообразные продукты сгорания не содержат O_2 и состоят из CO_2 , SO_2 , N_2 и H_2O . Для твердых и жидких топлив (кроме сланцев) объем трехатомных газов (SO_2 , CO_2) определяется на основании уравнения соответствующей реакции.

Теоретический объем азота, m^3/kg , переходящего в процессе сгорания из воздуха и топлива, определяется:

$$V_{N_2}^0 = \frac{100-21}{21} V_{O_2}^0 + \frac{N^p}{100 \cdot 1,251} = 3,76 V_{O_2}^0 + 0,008 N^p \quad (3.2)$$

или

$$V_{N_2}^0 = 0,79 V_B^0 + 0,008 N^p, \quad (3.3)$$

где $0,79 V_B^0$ – азот, вносимый с поступающим воздухом для процесса горения;

$0,008 N^p$ – азот из топлива;

$1,251$ – плотность азота, kg/m^3 .

Для сухих газов, содержащих CO_2 , SO_2 , N_2 , CO , O_2 при замене N_2 через соответствующее ему количество O_2 получаем соотношение, характеризующее баланс кислорода воздуха:

$$R_{\text{O}_2} (1 + \nu) + \text{CO}(0,605 + \nu) + \text{O}_2 = 21\%, \quad (3.4)$$

где ν – характеристика топлива;

Для твердого и жидкого топлива:

$$\nu = \frac{2,35\text{H}^{\text{P}} - 0,126\text{O}^{\text{P}} + 0,038\text{N}^{\text{P}}}{\text{C}^{\text{P}} + 0,375} \quad (3.5)$$

Значение ν зависит от горючей массы топлива, в основном от соотношения в топливе водорода и углерода.

Для газообразного топлива:

$$\nu = \frac{0,209\text{N}_2^{\text{T}} + 0,395\text{CO}^{\text{T}} + 0,396\text{H}_2^{\text{T}} + 1,58\text{CH}_4^{\text{T}} + 2,389\text{C}_m\text{H}_n^{\text{T}}}{\text{CO}_2^{\text{T}} + 0,994\text{CO}^{\text{T}} + 0,995\text{CH}_4^{\text{T}} + 2,001\text{C}_m\text{H}_n^{\text{T}}} - 0,791, \quad (3.6)$$

где N_2^{T} , CO^{T} , CO_2^{T} , H_2^{T} , CH_4^{T} , $\text{C}_m\text{H}_n^{\text{T}}$ – компоненты газообразного топлива, %.

Топливная характеристика ν для твердого и жидкого топлива всегда положительна, для газообразного топлива может быть отрицательной. Последнее связано с тем, что в отдельных видах газообразного топлива имеется значительное количество CO_2 .

При $\alpha=1$ и полном сгорании топлива ($\text{O}_2=0$) получаем выражение для определения максимально возможного содержания RO_2 в процессе сгорания, %:

$$\text{RO}_2^{\text{max}} = \frac{21}{1 + \nu} \quad (3.7)$$

При $\nu > 1$ $\text{RO}_2 < \text{RO}_2^{\text{max}}$.

Для действующей установки коэффициент избытка воздуха в топке α^{T} по газовому тракту можно определить по составу продуктов сгорания, учитывая, что объем V_{RO_2} в процессе сгорания не зависит от коэффициента избытка воздуха:

$$\frac{\text{RO}_2^{\text{max}}}{100} V_{\text{сг}}^0 = \frac{\text{RO}_2}{100} [V_{\text{сг}}^0 + (\alpha - 1)V_{\text{в}}^0]. \quad (3.8)$$

Принимая, что $V_{\text{сг}}^0 \approx V_{\text{в}}^0$:

$$\bar{\alpha} = \frac{RO_2^{\max}}{RO_2}, \quad (3.9)$$

Значение α можно определять по содержанию в продуктах сгорания O_2 , CO_2 , N_2 и др.

Если содержанием мазута в топливе пренебречь и считать, что концентрация N_2 в продуктах сгорания равна концентрации N_2 в воздухе (79%), при наличии в продуктах сгорания свободного O_2 .

$$\bar{\alpha} = \frac{21}{21 - O_2}, \quad (3.10)$$

где 21 % – начальное содержание O_2 в воздухе, поданном для сжигания топлива.

21- O_2 – часть ее, использованная для горения.

При учете изменения в процессе сгорания содержания азота для случая полного сгорания:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{1 - \frac{79O_2}{21N_2}}, \quad (3.11)$$

где $N_2 = 100 - (CO_2 + SO_2 + O_2)$.

При наличии в процессе сгорания O_2 и одновременно продуктов сгорания CO , H_2 и др. учитывают фактическое количество избыточного O_2 :

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{79 O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4}{21 N_2}. \quad (3.12)$$

Формула (3.12) пригодна для определения α в процессе сгорания при сжигании твердого, жидкого и газообразного топлива, для которых содержание N_2 мало.

В общем виде при учете N_2^T топлива формула для определения α имеет вид:

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{79 O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4}{21 N_2 - \frac{N_2^T}{V_{cr}}}. \quad (3.13)$$

Обработка опытных данных

Выбрать топливо и произвести расчет согласно вышеизложенной методике.

Контрольные вопросы

1. Анализ балансового уравнения общего содержания продуктов сгорания топлива.
2. Что влияет на величину характеристики топлива?
3. Описать влияние вида и состава топлива на выход оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Лабораторная работа № 4

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ СЕРЫ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Цель работы: установить влияние состава топлива на выход SO_2 и температуры на образование SO_3 .

Теоретическая часть

Присутствие серы в топливе в значительной степени определяет его склонность к образованию вредных выбросов при сжигании и коррозионную активность продуктов сгорания.

В топливе сера находится в виде различных соединений. Серу подразделяют на: органическую S_0 , если она связана с углеродом, водородом, азотом; колчеданную S_k , связанную с железом (железный колчедан FeS) и сульфатную S_c в виде соединений RSO_4 . В горючую часть топлива включают только органическую и колчеданную серу, которые участвуют в процессе горения, образуя сернистый (SO_2) и серный (SO_3) ангидриды. Сульфатную серу относят к негорючей части топлива. В твердом топливе содержание серы достигает 5%, в жидком-3,5%.

Присутствие серы значительно снижает теплоту сгорания топлива, особенно высококалорийного, так как при сгорании 1 кг серы выделяется в среднем только 2600 калорий. Высокое содержание серы приводит к сильному загрязнению продуктов сгорания топлива сернистым ангидридом SO_2 . При наличии избыточного воздуха происходит частичное окисление SO_2 до SO_3 (соединяясь с H_2O , образуют H_2SO_4). H_2SO_4 вызывает коррозию поверхности нагрева, разрушает металл котельного оборудования, попадая в атмосферу, вредно действует на живые организмы и растительность. Содержание окислов серы в продуктах сгорания значительно повышает температуру точки росы (иногда до 140 – 150 °C), что ограничивает возможную глубину охлаждения дымовых газов по условиям коррозии и тем самым снижает экономичность котловых агрегатов, а также возможность использования дополнительного оборудования для использования теплоты дымовых газов. Поэтому сера – крайне нежелательный элемент для топлива. Сернистые газы, проникая в рабочие помещения, могут вызвать отравление обслуживающего персонала.

Максимальная концентрация SO_3 :

$$[\text{SO}_3]_{\max} = a \cdot \left(\frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \frac{k_2}{k_1 - k_2}, \% \quad (4.1)$$

где a – начальная концентрация кислорода, %;
 k_1 и k_2 – коэффициенты скорости образования и распада SO_3 , c^{-1} .

Значения этих коэффициентов зависят от температуры газов и имеют следующие значения:

Таблица 4.1

$T, ^\circ\text{C}$	1540	1510	1082	987
k_1, c^{-1}	100	97,3	57,1	48,4
k_2, c^{-1}	16,3	14,1	0,78	0,32

При этом время достижения $[\text{SO}_3]_{\max}$:

$$\tau_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right)}{k_1 - k_2}, \text{c} \quad (4.2)$$

С увеличением избыточного воздуха в зоне факела уменьшается концентрация SO_2 с запасом избыточной энергии, что приводит к снижению образования кислорода и SO_3 ; с другой стороны, к уменьшению избыточного кислорода до нуля. Есть определенный избыток воздуха α (в интервале 1,15 – 1,30), при котором концентрация SO_3 минимальна.

Ход работы

1. Принимаем начальную концентрацию кислорода $a = 100$.
2. Из таблицы для расчетных температур устанавливаем значения коэффициентов k_1 и k_2 .
3. Пользуясь зависимостями (4.1) и (4.2), определяем значения коэффициентов $[\text{SO}_3]_{\max}$ и τ_{\max} .
4. Результаты расчетов сводим в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

$T, ^\circ\text{C}$	k_1, c^{-1}	k_2, c^{-1}	$[\text{SO}_3]_{\text{max}}, \%$	$\tau_{\text{max}}, \text{c}$
1540				
1510				
1082				
987				

5. На основании полученных данных построить графические зависимости $[\text{SO}_3]_{\text{max}} = f(T)$ и $\tau_{\text{max}} = f(T)$ и сделать соответствующие ВЫВОДЫ.

Контрольные вопросы

1. Какие составляющие исходного топлива образуют оксиды серы?
2. Виды серы.
3. Отрицательное влияние серы, присутствующей в топливе.
4. Какие оксиды серы представляют наибольшую опасность и почему?
5. Значения коэффициентов избытка воздуха, при которых концентрация SO_3 минимальна.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГОРЕЛКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗА

Цель работы: ознакомиться с условиями устойчивых режимов работы горелок и на основании опытных зависимостей определить скорости, в диапазоне которых возможно сохранить устойчивый режим.

Теоретическая часть

Устойчивость горения в широком диапазоне изменения расходов газа и воздуха является существенным фактором, определяющим надежность работы газовых горелок. В практике сжигания газа часто приходится сталкиваться с нарушением устойчивой работы горелок, вызываемым либо отрывом пламени от насадки горелки, либо проскоком пламени в ее смесительную часть.

Вопросам устойчивости пламени посвящен целый ряд теоретических и экспериментальных работ. Основной задачей этих исследований было, с одной стороны, получить необходимые экспериментальные данные по устойчивости процесса горения, а с другой – разработать расчетные модели для аналитического определения этих характеристик.

В свете современных воззрений устойчивость горения тесно связана со скоростью распространения пламени в газозоудшной смеси.

Рассмотрим условия, при которых пламя сохраняет устойчивость, т. е. остается неподвижным относительно устья горелки. Известно, что в зоне горения устанавливается динамическое равновесие между стремлением пламени продвинуться навстречу потоку газозоудшной смеси и стремлением потока отбросить пламя от горелки. Однако указанное явление наблюдается в определенном (очень узком) интервале скоростей истечения газозоудшной смеси из горелки. Когда скорость распространения пламени в какой-либо точке фронта горения превысит скорость истечения газозоудшной смеси, возникает проскок пламени. А в тех случаях, когда скорость газозоудшной смеси во всех точках фронта горения превышает скорость распространения пламени, происходит отрыв пламени.

Таким образом, устойчивая работа горелки наблюдается в диапазоне скоростей $w_{пр} < w < w_{отр}$, где $w_{пр}$ – скорость истечения газовой смеси, при которой наступает проскок пламени; $w_{отр}$ – скорость истечения газовой смеси, при которой наступает отрыв пламени.

Из факторов, влияющих на отрыв и проскок пламени, необходимо отметить: состав газа и газовой смеси, диаметр выходного отверстия насадки, режим истечения смеси и конструктивные особенности горелок.

Устойчивое горение газа, как было показано выше, находится между областью проскока и отрыва пламени. От ширины этой зоны зависят и пределы регулирования нагрузки горелки. Чем ниже скорость, при которой наступает проскок пламени, и выше скорость, при которой наступает его отрыв, тем шире диапазон устойчивой работы горелок.

Явление проскока может наблюдаться только у горелок полного или частичного предварительного смешения. У горелок с отдельной подачей газа и воздуха, в которых смешение идет одновременно с горением, проскока пламени не бывает. Отрыв пламени может наблюдаться у горелок как предварительного смешения, так и других типов.

На основании опытных данных были получены обобщенные зависимости предельных способностей от диаметра насадки горелки – d , м; коэффициента избытка воздуха – α ; нормальной скорости распространения пламени – u_n , м/с; коэффициента температуропроводности смеси – a , м²/с.

При сжигании газа открытым факелом в инжекционных горелках и горелках с принудительной подачей воздуха:

а) для определения скорости, при которой наступает отрыв пламени,

$$w_{отр} = c\alpha^{-3}u_n^{1,5}(d/a)^{0,5}, \quad (5.1)$$

где $c=0,28$ – для инжекционных горелок, $c=0,18$ – для горелок с принудительной подачей воздуха;

б) для определения скорости, при которой наступает проскок пламени ($\alpha = 1,0$),

$$w_{пр.макс} = cu_n^2 d / a, \quad (5.2)$$

где $c=4,5 \cdot 10^{-3}$ – для инжекционных горелок, $c=2,8 \cdot 10^{-3}$ – для горелок с принудительной подачей воздуха.

При сжигании газа в топочной камере для горелок с керамическими туннелями ($D_T = 2,5d$):

а) для определения скорости, при которой наступает отрыв пламени,

$$w_{\text{отр}} = c_1 \bar{b}^{-2} u_{\text{н}}^{1,5} (D_T / a)^{0,5}, \quad (5.3)$$

где $c_1 = 57,5 \cdot 10^{-3}$.

б) для определения скорости, при которой наступает проскок пламени ($\alpha = 1,0$),

$$w_{\text{пр.мах}} = c_1 u_{\text{н}}^2 d / a, \quad (5.4)$$

где $c_1 = 7,75 \cdot 10^{-3}$

С помощью полученных формул может быть определен диапазон устойчивой работы исследованных горелок при работе их на газе любого состава. Для этого определяют скорость истечения газовой смеси из горелки, при которой наступает отрыв или проскок пламени, а затем по этому значению давление газа, вызывающее нарушение устойчивой работы горелки.

Ход работы

Принимаем исходные данные для выполнения расчета:

- нормальная скорость распространения пламени – $u_{\text{н}} = 0,35$ м/с;
- диаметр выходного отверстия насадки горелки – $d = 50$ мм;
- коэффициент температуропроводности – $a = 0,189 \cdot 10^{-4}$ м²/с;
- коэффициент избытка воздуха – $\alpha = 1,05$;
- диаметр сопла – $d_c = 3,3$ мм.

Рассчитываем пределы скоростей:

а) при сжигании газа открытым факелом в инжекционных горелках и горелках с принудительной подачей воздуха по уравнениям 5.1 и 5.2;

б) при сжигании газа в топочной камере с керамическими туннелями по уравнениям 5.3 и 5.4.

Определяем давление природного газа, при котором произойдет проскок пламени в инжекционной горелке полного предварительного смешения. Для этого определим количество газовой смеси, проходящей через горелку в установленном режиме:

$$V_{\Gamma.B.C.} = w_{\text{пр.маx}} \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 3600, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.5)$$

По расходу газовой смеси находим расход газа:

$$B_{\Gamma} = V_{\Gamma.B.C.} / (1 + \beta \cdot V_0) = \frac{V_{\Gamma.B.C.}}{(1 + 1,0 \cdot 9,5)}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.6)$$

Определяем скорость истечения газа из сопла:

$$w_{\Gamma} = \frac{B_{\Gamma}}{f_c} = \frac{B_{\Gamma}}{0,785 \cdot d_c^2 \cdot 3600}, \text{ м/с} \quad (5.7)$$

По значению скорости газа определяем давление газа перед соплом горелки:

$$P_{\Gamma} = \frac{w_{\Gamma}^2 \cdot \rho}{2 \varphi^2} = \frac{w_{\Gamma}^2 \cdot 0,76}{2 \cdot 0,85^2}; \text{ Па} \quad (5.8)$$

По результатам расчетов необходимо выбрать режимы работы горелок.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры влияют на режимы работы горелок?
2. Охарактеризовать скорости проскока и отрыва пламени.
3. Какие зависимости получены для определения величины скоростей проскока и отрыва пламени?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов В. Л. Сжигание мазута в топках котлов. – Л.: Недра, 1989.
2. Карабин А. И. и др. Сжигание мазутов. – М.: Metallургия, 1966.
3. Кнорре А. Н. и др. Теория топочных процессов. – М. –Л.: Энергия. –1966.
4. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. – Л.: Недра, 1987.
5. Воликов А. Н. Сжигание газового и жидкого топлива в котлах малой мощности. –Л.: Недра, 1989.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОГРЕВА КАПЕЛЬ ЖИДКОГО ТОПЛИВА.....	3
Лабораторная работа №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫГОРАНИЯ КАПЕЛЬ МАЗУТА В ФАКЕЛЕ ПРЯМОТОЧНОЙ ГОРЕЛКИ.....	6
Лабораторная работа №3. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА СОДЕРЖАНИЕ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ТРЕХАТОМНЫХ ГАЗОВ.....	10
Лабораторная работа №4. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ СЕРЫ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА.....	14
Лабораторная работа №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГОРЕЛКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗА.....	17
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	21

Овсянник Наталья Владимировна
Волкова Екатерина Николаевна
Нижников Артем Александрович

ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА И СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу для студентов специальности
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 08.12.10.

Рег. № 45Е.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>