

П.А. ХАВАНОВ, В.А. ПАВЛЕНКО

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА ТЕПЛОБМЕН  
В ОХЛАЖДАЕМЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ МАЛОГО ОБЪЕМА

Резюме. В работе показаны опыты и результаты определения критерии, имеющих значение при тепловых расчетах охлаждаемых камер сгорания малого объема.

$I_{ух}$	- энтальпия продуктов сгорания при температуре уходящих газов,
$I_{теор}$	- энтальпия продуктов сгорания при теоретической температуре горения,
$I_{ст}$	- энтальпия продуктов сгорания при температуре стенки,
$D_{турб}$	- коэффициент турбулентной диффузии,
$r$	- радиус камеры,
$\lambda_{луч}$	- коэффициент лучистой теплопроводности по Росселанду,
$\sigma_0$	- постоянная Стефана - Больцмана,
$n$	- показатель преломления среды,
$\epsilon_{ст}$	- степень черноты поверхности,
$\lambda_{мол}$	- коэффициент молекулярной теплопроводности,
$k$	- коэффициент поглощения,
$k_0$	- коэффициент поглощения при $\alpha = 1$ ,
$d_k$	- диаметр камеры сгорания,
$\tau_0 = k \cdot d_k$	- оптическая толщина,
$\alpha$	- коэффициент избытка воздуха,
$d_r$	- диаметр горелочного устройства,
$l$	- длина камеры,
$Re_H$	- число Рейнольдса.

Исследование теплообмена в охлаждаемых камерах сгорания и изучение влияния на его интенсивность различных факторов является сложной и актуальной задачей.

Из анализа теоретических и экспериментальных данных по теплообмену в камерах сгорания различных установок следует, что существующие методы не учитывают особенности теплообмена в топках малых геометрических размеров и не могут быть использованы для их теплового расчета.

Процесс теплопереноса в топках от излучающего потока продуктов сгорания определяется интенсивностью конвективного, молекулярного и лучистого переноса, зависящих от условий ввода, воспламенения и горения топливо-воздушной

смеси, изменения физико-химических свойств среды, гидродинамических условий протекания процесса и других факторов. Конвективная теплоотдача, излучение и молекулярная теплопроводность, как составляющие сложного теплопереноса, в зависимости от условий развития и протекания процесса вносят различный количественный вклад в результирующий теплоперенос. Пренебрежение какой-либо из этих составляющих без детального анализа процесса может привести к искажению действительной физической стороны теплопереноса и, следовательно, к неправильным количественным связям в этом процессе. К такому же результату приводит и анализ индивидуального вклада каждой составляющей без учета их взаимного влияния [1].

Анализ процессов переноса теплоты конвекцией, молекулярной и турбулентной теплопроводностью и излучением при течении газа приводит к системе дифференциальных и интегродифференциальных уравнений, которые следует решать совместно. Математические трудности, возникающие при решении этой системы, приводят к необходимости поисков методов приближенного решения. Основное допущение при этом связано с исключением интегральных членов из уравнения переноса энергии, которые вводятся в него в следствии наличия излучения. Операцию исключения проще всего осуществить в предельных случаях оптической толщины излучающего слоя: очень большой и очень малой.

Интенсивность переноса теплоты излучением в камерах сгорания малого объема и топках парогенераторов и технологических печей может быть различной даже при одинаковых температурных условиях, поскольку оптические свойства слоя излучающих продуктов сгорания в камерах большого и малого объема сильно отличаются по своим численным значениям. В связи с этим в топочных камерах малого объема при формулировании задачи исследования теплообмена важное значение приобретает вопрос о диапазоне изменения оптических свойств топочной среды, так как известно, что физическая модель процесса для определения переноса энергии излучением и конечные результаты зависят от оптической плотности среды в большой степени.

Расчетное исследование оптических свойств среды в топочных камерах малого размера показало, что независимо от методов расчета усредненного коэффициента поглощения, излучающая среда не является ни оптически тонкой, ни оптически толстой.

При промежуточных значениях оптической толщины излучающего слоя для выявления закономерностей процесса необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований, так как в некоторых случаях возможно использование коэффициентов поглощения, усредненных по Планку (приближение оптически тонкого слоя) или по Росселанду (приближение оптически толстого слоя) [2].

Анализ опытных данных показал, что в исследуемом диапазоне оптических толщин обобщение экспериментальных данных, полученных на описываемой ниже установке, может производиться на основе коэффициентов поглощения, усредненных по Росселанду.

Интегральный теплоперенос можно определить функциональным числом интегрального теплообмена

$$K_T = \frac{I_{\text{теор}} - I_{\text{ух}}}{I_{\text{теор}} - I_{\text{ст}}} \quad (1)$$

В этом случае  $K_T$  определяет эффективность работы камеры сгорания и является функцией теплообмена между движущимся излучающим потоком газа и поверхностью нагрева камеры сгорания [3].

Перенос тепла из объема камеры сгорания к её стенкам осуществляется через пограничный слой за счет излучения и турбулентной диффузии (молекулярным переносом в рассматриваемом случае можно пренебречь).

На границе пограничного слоя и стенки теплоперенос к стенке осуществляется молекулярной теплопроводностью и результирующим излучением среды и поверхности нагрева.

Уравнение баланса тепла на поверхности, соответствующей единице длины цилиндрической камеры, при использовании диффузионного приближения для переноса энергии излучением записывается в следующем виде

$$-D_{\text{турб}} \cdot \frac{d(\varphi_{\text{ст}} T)}{dr} - \lambda_{\text{луч}} \frac{dT}{dr} = \frac{60 n^2 (T_{\text{с}}^4 - T_{\text{ст}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - \frac{1}{2}} - \lambda_{\text{мол}} \cdot \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

Уравнение [2] записано для поверхностей, подчиняющихся закону Кирхгофа.

Из полученного уравнения баланса тепла на границе стенки и пограничного слоя можно составить следующие критерии:

1. Критерий радиационного подобия:

$$K_{\text{рад}} = \frac{k \cdot d_k}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - \frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{T_{\text{ст}}}{T} + \left( \frac{T_{\text{ст}}}{T} \right)^2 + \dots + \left( \frac{T_{\text{ст}}}{T} \right)^n \right] \quad (3)$$

На основе анализа входящих в (3) величин и с учетом особенностей теплопереноса в малых топочных камерах критерий радиационного подобия может быть преобразован к виду

$$K_{\text{рад}} = f(k, d, \alpha) = f(\tau_0, \alpha) \quad (4)$$

2. Критерий турбулентно-молекулярного переноса

$$K_{\text{т-м}} = \frac{D_{\text{турб}} \cdot \varphi(I_{\text{теор}} - I_{\text{ст}})}{\lambda_{\text{мол}} \cdot (T_{\text{теор}} - T_{\text{ст}})}, \quad (5)$$

который в рассматриваемых условиях может быть выражен

$$K_{\text{т-м}} = f_1 \left( Re_n, \frac{dr}{d_k}, \frac{1}{d_k} \right) \quad (6)$$

## 3. Критерий радиационно-молекулярного переноса

$$K_{p-m} = \frac{6_0}{k} \frac{\pi^2 \cdot T^3}{\lambda_{\text{мол}}} \quad (7)$$

В рассматриваемых условиях  $K_{p-m}$  не оказывает влияния на теплообмена в камере сгорания.

Для гомогенных реакций горения влиянием реакционно-кинетических факторов на теплообмен можно пренебречь или считать их идентичными для подобных камер сгорания с подобными условиями ввода реагирующих масс.

Таким образом, уравнение подобия для определения теплообмена для данного случая может быть представлено в следующем виде

$$K_T = \phi(R_{вн}, \tau_0, \alpha, \frac{dr}{dk}, \frac{1}{dk}) \quad (8)$$

Функциональная зависимость числа интегрального переноса от критериальных чисел-аргументов наиболее надежно может быть определена на основе экспериментального исследования сложного теплообмена на моделях и реальных установках.

Экспериментальное исследование сложного лучисто-конвективного теплообмена проводилось на полностью калориметрируемых камерах сгорания, выполненных в реальном масштабе (рис. 1). Установка состояла из охлаждаемых водой секционных камер сгорания (1), горелочных устройств на жидком и газообразном топливе с различными условиями ввода и сжигания топливно-воздушной смеси (2) устройств для подачи и регулирования расхода воздуха, топлива и охлаждающей воды, а также контрольно-измерительных приборов для определения давления, расхода воды, температур и состава топлива и продуктов сгорания.

Камеры сгорания представляли собой вертикальные цилиндрические теплообменники диаметром  $d_k = 0,18; 0,24; 0,3; 0,36$  м, собираемые из секций с целью получения средних зональных тепловых потоков на поверхностях, соответствующих относительной длине  $\frac{1}{dk} = 1/3$ , рассчитываемых на основе определения температуры и расхода теплоносителя в точках "В".

Для исследования влияния на теплообмен длины камеры сгорания при неизменных тепловых напряжениях топочного объема  $q_v$  экспериментально определялся интегральный теплоперенос в камерах длиной  $\frac{1}{dk} = 1; 1 \frac{1}{3}; 2; 2 \frac{1}{3}$ .

В верхней части камеры сгорания устанавливался выходной калориметр в виде полого охлаждаемого водой диска с дымогарными трубами (7), распределенными на поверхности таким образом, чтобы соотношение площади поперечного сечения камеры сгорания и площади выходного сечения дымогарных трубок сохранялось постоянным для камер различного диаметра.

Температура продуктов сгорания на выходе из цилиндрической части определялась по данным измерения температуры газов в точке "А", расположенной между экранами 8 и величине тепловосприятия выходного калориметра.

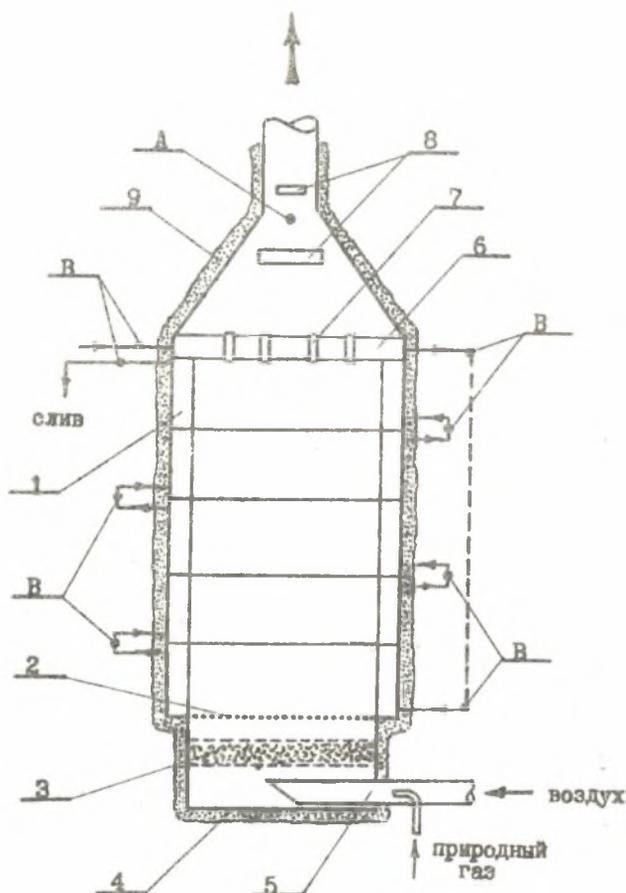


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В одной из серий опытов камеры сгорания оснащались горелкой полного предварительного смешения воздуха с природным газом. Горелка состояла из корпуса 4, смесителя 5, слоя керамической крошки 3, предназначенного для выравнивания поля скоростей топливо-воздушной смеси и нагрева этой смеси, нихромовой сетки 2, на которой осуществлялось кинетическое сжигание газа с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,05 - 2,0$ .

Полученное уравнение (8) позволяет на основании обобщения экспериментальных данных провести анализ воздействия режимных и геометрических факторов, а также свойств поглощающей среды на теплообмен в охлаждаемой камере сгорания при идентичных условиях выода.

Исследование, проведенное в настоящей работе и в [4] показывает, что коэффициент поглощения продуктов сгорания  $K$  рассчитываемый по диффузионному приближению Росселанда, является величиной обратно пропорциональной коэффициенту избытка воздуха. В этом случае критерий радиационного подобия может быть представлен так

$$K_{\text{рад}} = \frac{k_0 d_K}{\alpha} \quad (9)$$

Коэффициент поглощения продуктов сгорания при  $\alpha = 1,0$  составляет для природного газа  $k_0 = 3,34 \text{ м}^{-1}$  и для мазута  $k_0 = 3,92 \text{ м}^{-1}$ .

Коэффициент избытка воздуха оказывает различное влияние на отдельные составляющие сложного теплового потока.

С увеличением коэффициента избытка воздуха происходит интенсификация конвективного переноса тепла в следствие возрастания критерия  $Re$ .

Одновременно уменьшается теоретическая температура горения топлива и парциальные давления трехатомных газов, т.е. коэффициент избытка воздуха влияет на величину оптической толщины среды.

Введение коэффициента избытка воздуха в качестве аргумента не исключает из рассмотрения критерий  $Re$  несмотря на имеющую место зависимость этого критерия от  $\alpha$ . Это объясняется тем, что при постоянных значениях  $\alpha$  и  $\frac{1}{d_K}$  изменение  $Re$  определяет режим течения излучающей среды, т.е. определяет интенсивность конвективного переноса тепла. Одновременно критерий является функцией теплового напряжения объема камеры сгорания.

Коэффициент избытка воздуха при неизменных значениях  $Re$  и  $\frac{1}{d_K}$ , но при различных удельных энерговыделениях в объеме камеры характеризует изменение радиационной составляющей в сложном теплообмене.

Опытные данные обрабатывались по методике, позволяющей определить зависимость радиационной и конвективной составляющих от коэффициента избытка воздуха.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие зависимости, отражающие влияние коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на теплообмен в камере сгорания

$$K_T = A \left( \frac{k_0 d_K}{\alpha} \right)^{0,47} \quad \text{при } Re = \text{const}; \quad \frac{1}{d_K} = \text{const} \quad (10)$$

$$K_T = B Re_H^{-0,33} \quad \text{при } \alpha = \text{const}; \quad \frac{1}{d_K} = \text{const} \quad (11)$$

В качестве определяющей скорости газов принималась скорость, отнесенная к единице тепловоспринимающей поверхности, за определяющий размер принимался диаметр камеры, за определяющую температуру — теоретическая температура горения.

На рис. 2 демонстрируется влияние коэффициента  $\alpha$  на радиационную составляющую при неизменной величине конвективного переноса тепла. Уравнение (11) описывает зависимость конвективной составляющей переноса теплоты от  $Re_H = f(q_v)$  при малом изменении интенсивности теплоотдачи излучением.

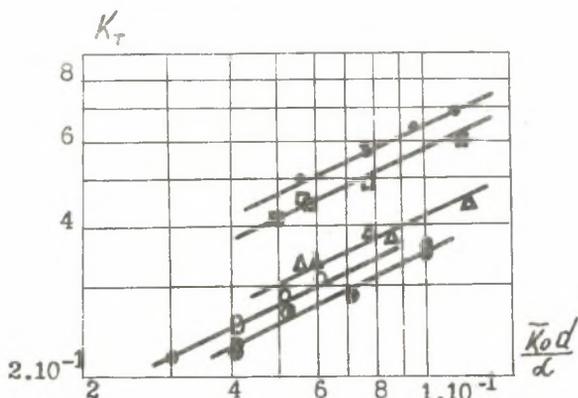


Рис. 2. Зависимость числа интегрального теплопереноса от критерия  $\frac{k_0}{\alpha}$   
 ● -  $\frac{1}{d_k} = 7/3$ ,  $Re_H = 67,1-80,1$ ; ○ -  $\frac{1}{d_k} = 7/3$ ,  $Re_H = 299,1-315,2$ ; □ -  $\frac{1}{d_k} = 7/3$   
 $Re_H = 121,1-137,1$ ; △ -  $\frac{1}{d_k} = 3/3$ ,  $Re_H = 120,6-144,4$ ; ● -  $\frac{1}{d_k} = 4/3$ ,  $Re_H =$   
 $= 189,9-211,3$

Обобщение результатов обработки опытных данных степенной функцией позволило получить частные зависимости числа интегрального переноса  $K_T$  от критериальных чисел - аргументов, входящих в уравнение подобия (8).

Результаты обработки опытов в точных камерах диаметром  $d = 0,18-0,36$  м, оборудованных горелками полного и неполного предварительного смешения топлива с воздухом, при распределенном по сечению входе топливо-воздушной смеси обобщены зависимостью

$$K_T = \frac{1}{1 + 0,1016 (Re_H)^{0,55} \left(\frac{k_0 \cdot d}{\alpha}\right)^{-0,86} \left(\frac{1}{d_k}\right)^{0,75}} \quad (12)$$

В опытах нагрузка камеры сгорания по топливу изменялась в пределах  $1,5 \cdot 10^{-4} - 17,5 \cdot 10^{-4}$  кг/с, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,05 - 2,0$ , температура на выходе из топки на входе в выходной калориметр  $T_2 = 1011 - 1752$  К, условное число Рейнольдса  $Re_H = 66 - 359$ , относительная длина камеры  $\frac{1}{d_k} = 1 - 1 \frac{1}{3}$ , критерий радиационного подобия  $\frac{k_0 \alpha}{\alpha} = 0,301 - 1,145$ , число интегрального теплопереноса  $K_m = 0,15 - 0,67$ , удельное энерговыделение в камере  $q_v = 0,76 - 1,73$  МВт/М<sup>3</sup>.

Оценка достоверности полученных экспериментальных данных показала, что величина предельной среднеквадратичной погрешности определения числа интегрального теплопереноса  $K_m$  составляет 3,24%. Корректная оценка соответствия обобщенной зависимости (12) была произведена по числу интегрального теплопереноса  $K_m$  и температуре газов на выходе из камеры  $T_2$ . Для всех опытов отклонения расчетных данных от результатов эксперимента с вероятностью 95% не выходит за пределы доверительного интервала  $\pm 9,55\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Goulard R., Goulard M.: Energy transfer in the Couette flow of a radiant and chemically reacting gas. Proceeding of the Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute Stanford University Press. Palo Alto., Calif. 1959, pp 129-139.
- [2] Abu-Romia H.M., C.L. Tien: Appropriate Mean absorption coefficients for infrared radiation of gases. Trans. of the ASME, ser. C, Journal of Heat Transfer, No 4, 1967, pp 321-327.
- [3] Шорин С.Н.: Теплопередача. Москва, "Вышая школа", 1964.
- [4] Коновакова Н.М., Шорин С.Н., Шурин Р.М.: Расчет теплообмена в камерах сгорания трубчатых печей при высокой температуре поверхности. Сборник "Химическое машиностроение" Москва 1974.

WPLÝW WSPÓLCZYNNIKA NADMIARU POWIETRZA NA WYMIANĘ CIEPŁA  
W CHŁODZONYCH KOMORACH SPALANIA MAŁEJ OBJĘTOŚCI

## S t r e z e z e n i e

W pracy zaproponowano kryterialny opis wielkości mających istotne znaczenie dla uwzględnienia wpływu współczynnika nadmiaru powietrza  $\alpha$  na wymianę ciepła w małoobjętościowych komorach spalania. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwalają ocenić wpływ tych kryteriów, ich wartości oraz ustalić postacie równań empirycznych.

EFFECT OF AIR SURPLUS ON HEAT EXCHANGE IN SMALL VOLUME  
COMBUSTION CHAMBERS

## S u m m a r y

A new criterial value description has been suggested important for the air surplus influence  $\alpha$  on heat exchange in small volume combustion chambers. Experimental results allow to evaluate the criteria their values and forms of empirical equations.

Opracował i przygotował do druku doc. dr hab. inż. Janusz Wandrzec