

В. В. Головки, Н. И. Полетаев, А. В. Флорко

*Институт горения и нетрадиционных технологий,
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова*

Роль излучения в тепловом балансе ламинарного диффузионного факела железа

В работе приведены результаты спектральных исследований зоны горения ламинарного диффузионного факела частиц железа. Показано, что температура в зоне горения факела слабо зависит от массовой концентрации частиц горючего. Частицы железа в условиях диффузионного факела горят гетерогенно. Продукты сгорания имеют кристаллическую фазу магнетита (Fe_3O_4). Роль излучения сводится к потерям тепла из зоны горения, которые составляют около 30% от общего тепловыделения химической реакции и в пределах ошибки измерений не зависят массовой концентрации горючего. Высокие теплотери при относительно невысоких температурах горения объясняются большими значениями факторов эффективности поглощения частиц железа.

Практика сжигания металлизированных горючих и эксперименты в области физики горения металлов давно показали, что продуктами их сгорания в кислородсодержащих средах чаще всего являются высокодисперсные оксиды металлов. Это явление изучалось, в основном, с позиций эффективного сжигания топлива в камерах сгорания различных реактивных и ракетных двигателей. В значительно меньшей мере исследовалась физика образования и характеристики конденсированной фазы при горении и практически не рассматривалась технологическая сторона проблемы — подход к факелу горящих частиц металла как к реактору для синтеза порошков оксидов металлов, в том числе нанопорошков.

Как известно [1-2], образование наноразмерных продуктов сгорания возможно при горении индивидуальных частиц металла в парофазном или газофазном режиме с последующей конденсацией продуктов сгорания в газовой фазе. Возможность реализации такого режима определяется как физико-химическими свойствами горючего, так и макропараметрами пылевого факела (концентрации горючего и окислителя, способ организации сжигания газозвеси, начальная температура системы), которые влияют на температуру в зоне горения, при которой возможен один из указанных выше режимов горения. Особенно актуальной является задача получения высоких температур при синтезе нанооксидов тяжелокипящих металлов ($T_{\text{кипения}} > 3000 \text{ K}$), таких как Zr, Ti, Fe и др.

При высоких температурах и наличии дисперсной фазы в тепловом ба-

лансе пылевого пламени важную роль играет лучистый теплообмен [3]. Его влияние, с одной стороны сводится к теплотерям и, следовательно, понижению температуры во фронте горения, что в свою очередь влияет на режимы горения частиц и конденсации продуктов сгорания, а с другой стороны, большие световые потоки могут инициировать зажигание и влиять на механизм и скорость распространения пламени по газозвеси частиц.

Радиационные потоки определяются как характеристиками исходного горючего, так и оптическими параметрами мелкодисперсных конденсированных продуктов сгорания: факторами эффективности поглощения и рассеяния, комплексным показателем преломления. Причем эти параметры могут сильно зависеть от температуры, длины волны и размера частиц.

В связи с этим целью настоящей работы явились исследования излучательных и оптических характеристик фронта ламинарного диффузионного двухфазного факела (ЛДДФ) газозвеси частиц железа и выяснение роли излучения к-фазы в тепловом балансе факела. Проведение таких исследований необходимо для оптимизации параметров ректора для синтеза порошков оксида железа.

Экспериментальная установка. Методика эксперимента

ЛДДФ железа получали с помощью “пылевой горелки” [1-2] состоящей из двух вертикальных коаксиальных цилиндров. По внутренней трубе несущим газом подавались частицы железа. По кольцевому зазору между внешней и внутренней трубкой подавался окисляющий газ (кислород или смесь кислорода с азотом). Объемные расходы газов в системе подачи порошка и обдува контролировались стандартными ротаметрами типа РМ-2.593. Массовый расход порошка в холодной газозвеси измерялся методом фильтрации через тканевый фильтр с последующим взвешиванием фильтра с порошком на аналитических весах типа ВЛА-200г-М. Погрешность измерения массовой концентрации горючего и объемных расходов не превышала 5-7%.

В экспериментах был использован промышленный порошок карбонильного железа РС-10 ($\langle d \rangle = 4$ мкм). Подачу порошка осуществляли азотом (97-99%) — ой чистоты. В качестве окислителя применялся технический кислород 95% — ой чистоты. Объемные расходы несущего и окисляющего газов устанавливались равными $W_1 = 250$ см³/с (несущий газ) $W_2 = (500-800)$ см³/с. Массовая концентрация горючего могла варьироваться в широких пределах от $4 \cdot 10^{-4}$ г/см³ до $15 \cdot 10^{-4}$ г/см³ (счетная концентрация частиц — $n_p = 3C / (4\pi \rho_m \langle r^3 \rangle) = (1 \div 4) 10^6$ см⁻³, ρ_m — плотность металла; $\langle r^3 \rangle^{1/3}$ -среднекубический радиус частиц железа)

Рентгенофазовый анализ продуктов сгорания железа в ЛДДФ позволил установить, что они имеют кристаллическую структуру магнетита (Fe₃O₄). Дисперсный анализ продуктов сгорания проводился с помощью оптического и электронного микроскопов. Отметим, что распределение частиц по размерам неплохо описываются логнормальным распределением:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp \left[-\frac{\ln^2(r_0/r)}{2\sigma^2} \right]$$

Параметры распределений исходных частиц и продуктов сгорания представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры функции распределения частиц Fe и Fe₃O₄ по размерам

Частицы	r ₀ , мкм	γ
Fe	2,2	0,35
Fe ₃ O ₄	2,8	0,35

Результаты дисперсного анализа и приведенные ниже данные спектральных измерений позволяют утверждать, что в ЛДДФ частицы Fe горят гетерогенно. Действительно, в этом случае температура κ-фазы во фронте факела значительно ниже температуры кипения железа T_κ = 3473К. Зона горения даже для очень мелких частиц горючего выглядит дискретной. Для всех массовых концентраций горючего в спектре отсутствуют молекулярные полосы и атомарные линии железа и его соединений с кислородом. Приведенные факты не оставляют сомнений о гетерогенном механизме горения Fe в данных экспериментальных условиях.

Обратимся к методике спектральных исследований. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение от объекта исследования (1) с помощью объектива (4) фокусировалось в плоскость входной скрещенной щели дифракционного спектрального прибора (5). Излучение регистрировалось с помощью ФЭУ-106 и ФЭУ-62 (6) и фиксировалось запоминающим осциллографом (7). Зафиксированный сигнал снимался видеокamerой (8) либо фотографировался.

Диафрагмирование фокусирующей оптики позволило получить достаточно высокое пространственное разрешение (около 100 мкм). Исследования проводились в диапазоне длин волн λ = (0,4±1) мкм. Постоянная времени регистрирующей системы не превышала 10⁻⁶с.

Спектральная светимость факела определялась с помощью банд-ламп. Несложно убедиться в том, что если банд-лампа и исследуемый факел устанавливаются в одном месте без изменения положения оптических элементов, диафрагм, ширины щелей и напряжения питания ФЭУ, то спектральная светимость пламени и банд-лампы r^{δ-λ}λ связаны соотношением:

$$r_{\lambda} = r_{\lambda}^{\alpha-\lambda} \frac{\alpha_{\lambda} \tau_{\lambda} r}{\beta_{\lambda}}, \quad (1)$$

где $\beta\lambda$ и $\alpha\lambda$ — величины выходных сигналов банд — лампы и пламени, соответственно; $\tau\lambda$ — коэффициент пропускания излучения окна банд — лампы, r — коэффициент отражения зеркала (3). В свою очередь:

$$r_{\lambda}^{\alpha-\lambda} = r_{\lambda,b} \cdot \varepsilon_{\lambda}^{\alpha-\lambda}, \quad (2)$$

где $r_{\lambda,b} = C_1 \cdot \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T}$ — формула Вина для спектральной светимости абсолютно черного тела, $C_1 = 3.704 \cdot 10^{-12}$ Вт·см², $C_2 = 1.4388$ см·К; $\varepsilon_{\lambda}^{\alpha-\lambda}$ — спектральная испускательная способность банд — лампы; T — истинная температура.

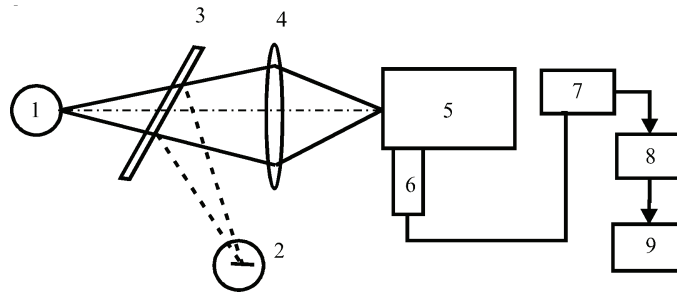


Рис. 1. 1 — объект исследования (ЛДДФ); 2 — источник сравнения (банд-лампа СИ10-300); 3 — поворотное зеркало; 4 — объектив; 5 — дифракционный спектральный прибор; 6 — фотоприемник (ФЭУ -106 (62)); 7 — запоминающий осциллограф; 8 — видеокамера; 9 — компьютер.

Температура к-фазы во фронте факела определялась полицветовым методом, суть которого заключается в следующем. По данным измерений спектральной светимости факела $r\lambda$ в достаточно широком спектральном интервале строился график зависимости $\ln r\lambda^5$ от $1/\lambda$. В интервале длин волн, в котором график представляет собой прямую линию, излучение можно считать серым, что и позволяет определить истинную температуру: $T_{\kappa} = -c_1/tg\alpha$ ($tg\alpha$ — тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс). Спектральная испускательная способность определялась согласно соотношения:

$\varepsilon_{\lambda} = \frac{r_{\lambda}}{r_{\lambda,b}}$, где $r_{\lambda,b}$ — спектральная светимость абсолютно черного тела при температуре конденсированной фазы.

Температура газовой фазы измерялась методом обращения резонансных линий натрия и по их абсолютным интенсивностям [4]. Ширину фронта факела находили из радиальных распределений с помощью абелевских преобразований, а геометрические параметры факела путем видеосъемки.

Результаты измерений

На рисунке 2 представлены данные измерений спектральной светимости r_λ для трех концентраций горючего.

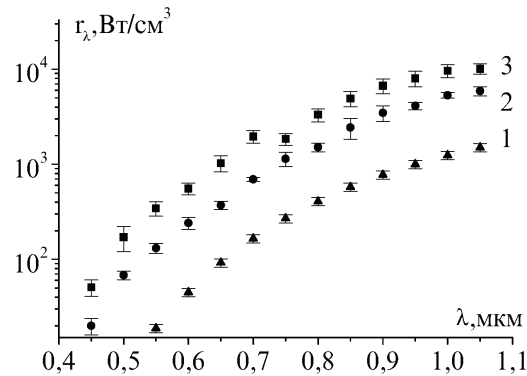


Рис. 2. Спектральная светимость ЛДДФ для различных концентраций горючего: 1 — $4,38 \cdot 10^{-4}$ г/см³; 2 — $8,3 \cdot 10^{-4}$ г/см³; 3 — $15,6 \cdot 10^{-4}$ г/см³;

Из рисунка 2 видно, что спектральная светимость с увеличением концентрации горючего (частиц Fe) возрастает. Причем интегральная светимость в указанном диапазоне концентраций горючего описывается соотношением:

$$\Delta R = \int_{0,45}^{1,05} r_\lambda d\lambda = (80 \pm 16) \cdot C, \quad (3)$$

где: ΔR — измеряется в Вт/см², а концентрация C — в г/см³

С помощью полицветового метода была определена температура конденсированной фазы в зоне горения ЛДДФ в широком диапазоне массовых концентраций горючего. Оказалось, что T_k линейно растет с увеличением концентрации C в пределах 100 К, т.е. практически не зависит от концентрации горючего.

$$T_k = (1740 \pm 50) + (1,1 \pm 0,1) \cdot 10^5 C \quad (4)$$

Измерения газовой температуры T_g показали отсутствие зависимости ее от величины C . Причем газовая температура оказалась ниже на 100 — 150 К температуры конденсированной фазы и равной $T_g = (1670 \pm 20)$ К.

Возможными причинами столь слабой зависимости температуры от массовой концентрации горючего могут быть фазовые переходы плавления железа (1812 К) и магнетита Fe₃O₄ (1870 К), стабилизирующие температуру конденсированной фазы. Визуальные наблюдения за фронтом пламени показывают, что в этом режиме практически отсутствуют треки взрывающих-

ся частиц железа, характерные для более высокотемпературных режимов горения газовзвесей (предварительно перемешанных с окислителем) железа.

Приведенные данные спектральных исследований, равно как и дисперсный анализ, свидетельствует о гетерогенном горении частиц железа во фронте ЛДД факела.

Спектральная светимость r_λ и температура к- фазы T_k позволили определить спектральную испускающую способность фронта факела ϵ_λ . Оказалось, в пределах погрешностей ϵ_λ в исследованном диапазоне длин волн можно считать величиной не зависящей от λ . Причем $\langle \epsilon \rangle$ для исследованного диапазона концентрации частиц определяется соотношением:

$$\langle \epsilon \rangle = (0.007 \pm 0.005) + (9.6 \pm 1.5) \cdot C \quad (5)$$

В приближении слабой зависимости ϵ_λ от длины волны в инфракрасном диапазоне, можно на основе закона Стефана — Больцмана оценить интегральную светимость фронта факела (мощность излучения с единицы площади):

$$R = \langle \epsilon \rangle \sigma T^4 \quad (6)$$

Представленные выше результаты позволили оценить роль излучения в тепловом балансе ЛДД факела железа.

Роль излучения в тепловом балансе факела

Сравним мощность излучения от всего факела с мощностью тепловыделения в результате химической реакции железа с кислородом. Несложно показать, что для оптически тонких источников спектральная светимость связана с интенсивностью излучения соотношением:

$$I = \frac{4R}{L_{эфф}} = \frac{4 \langle \epsilon \rangle \sigma T^4}{L_{эфф}} \quad (7)$$

где I — интенсивность излучения (энергия излучаемая единицей объема в единицу времени в 4π телесный угол), $L_{эфф}$ — ширина фронта факела.

Мощность излучения факела в целом, очевидно, будет определяться соотношением:

$$P_{rad} = I \cdot S \cdot L_{эфф} \quad (8)$$

где $S = \pi R_l l$ — площадь боковой поверхности факела; $SL_{эфф}$ — объем излучающей области, l — образующая боковой поверхности факела, которую далее принимаем равной его высоте h ($R_l < 0.1l$), R_l — радиус горелки. Тогда учитывая (6), окончательно получаем:

$$P_{rad} = 4 \langle \epsilon \rangle \sigma T^4 S \quad (9)$$

С другой стороны, мощность тепловыделения в результате горения:

$$P_{chem} = W_1 C q \quad (10)$$

где $q = 4886$ кДж/кг [5] — тепловой эффект реакции (конечный продукт Fe_3O_4);
Используя (9) и (10), получаем долю излучения в тепловом балансе:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{chem}} = \frac{4 \langle \epsilon \rangle \sigma T^4 h \pi R_1}{W_1 \cdot C \cdot q} \quad (11)$$

Зависимость высоты факела от концентрации горючего заимствовалась из работы [6]:

$$h = 12.25 + 7500 \cdot C \quad (12)$$

где h высота факела в см.

Используя выражения (4), (5), (11), (12) рассчитаем долю теплотерь излучением в тепловом балансе факела в зависимости от массовой концентрации горючего. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Зависимость характеристик ЛДДФ железа от массовой концентрации горючего

$C, \text{г/см}^3$	$T, \text{К}$	$\langle \epsilon \rangle$	$h, \text{см}$	$\eta, \%$
4,38E-04	1790	0,011	15.5	28.4
8,30E-04	1830	0,015	18.5	26.2
1,56E-03	1910	0,022	24.0	31.5

Из приведенных данных видно, что доля излучения в тепловом балансе ЛДД факела железа в пределах погрешностей измерений ($\pm 10\%$) не зависит от концентрации горючего. В тоже время, несмотря на относительно низкую температуру во фронте факела, эти потери весьма значительны. Очевидно, это связано с большой испускательной способностью к-частиц.

Излучательные характеристики к-частиц во фронте факела

Корректный учет влияния излучения на процессы горения требует информации об оптических характеристиках источников излучения. Таковыми являются факторы эффективности поглощения Q_a и рассеяния Q_s . Эти безразмерные оптические характеристики зависят как от характерного размера частицы, действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления $\tilde{n} = n - i \cdot \chi$ (и, как следствие, температуры), так и от длины волны излучения λ . Расчеты Q_a и Q_s проводятся с использованием теории Ми. Особый интерес представляют факторы эффективности поглощения, поскольку $Q_a(\lambda, \text{г,п,ч(T)}) = e_{a,\lambda}$ [7]. Здесь $e_{a,\lambda}$ -спектральная испускательная способность частицы. Последнее равенство позволяет рассчитать интенсивность излучения к-фазы согласно очевидному соотношению:

$$I_{\lambda} = n_1 \cdot r_{\lambda b} \int 4\pi r^2 Q_a(r) \cdot f(r) dr = \frac{4r_{\lambda}^2}{L_{\text{эфф}}} \quad (13)$$

где $n_1 = n_p T_x / T_z$ — счетная концентрация частиц во фронте факела, T_x , T_z — температура газа вблизи среза горелки и во фронте факела. Интегрирование производится в пределах функции распределения частиц по размерам $f(r)$. В формуле (13) мы использовали соотношение (7), но для спектральных величин.

Используя определение коэффициента поглощения для единичной концентрации частиц:

$$\beta_{\lambda} = \int \pi r^2 Q_a(r) \cdot f(r) dr \quad (14)$$

из (13) получаем:

$$\beta_{\lambda} = \langle \beta_{\lambda} \rangle = \frac{\langle \varepsilon \rangle T_z}{L_{\text{эфф}} n_p T_x} \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет определить $\langle \beta_{\lambda} \rangle$ или осредненные по функции распределения факторы эффективности поглощения частиц: $\langle Q_a \rangle = \langle \beta_{\lambda} \rangle / p \langle r^2 \rangle = \langle \varepsilon_{\lambda} \rangle$.

При сравнении выражений (14) и (15) складывается впечатление, что они противоречат друг другу. Действительно, теоретический коэффициент поглощения $\langle \beta_{\lambda} \rangle$, определенный согласно (14), при неизменном дисперсном составе продуктов сгорания ($f(r)$) и относительно слабой зависимости температуры к-фазы и, следовательно, Q_a от концентрации горючего, должен быть величиной постоянной. С другой стороны, экспериментально определенный коэффициент $\langle \beta_{\lambda} \rangle$ согласно выражению (15), может зависеть от концентрации горючего посредством $\langle \varepsilon_{\lambda}(C) \rangle$, $n_p(C)$, $T(C)$ и $L_{\text{эфф}}(C)$. Первые три функции известны (см. выше), последнюю экспериментально установить не удалось. Как уже упоминалось выше $L_{\text{эфф}}$ можно определить из радиальных распределений с помощью абелевских преобразований. При этом решается некорректная задача, которая предопределяет относительно большие погрешности измерений. Результаты измерений показали, что $L_{\text{эфф}} = 0.15 \pm 0.02$ см. В работе [8] теоретически установлена зависимость $L_{\text{эфф}} \sim C^{-1/2}$. Объединяя оба результата, получили: $L_{\text{эфф}} = 4.5 \cdot 10^{-3} \cdot C^{-1/2}$. При этом определенную экспериментально величину $L_{\text{эфф}}$ мы отнесли к $C = 9 \cdot 10^{-4}$ г/см³ (средина исследованного диапазона концентраций горючего). В таблице 3 представлены результаты косвенных измерений $\langle \beta_{\lambda} \rangle$ с использованием представленных выше зависимостей $\langle \varepsilon_{\lambda}(C) \rangle$, $n_p(C)$, $T(C)$ и $L_{\text{эфф}}(C)$ согласно соотношению (15).

Таблица.3

Зависимость коэффициента поглощения от массовой концентрации горючего

$C, 10^{-4} \text{ г/см}^3$	4	8	12	15
$\langle \beta_\lambda \rangle, 10^{-7} \text{ см}^2$	4.4	4.3	4.6	4.8

Как видно из таблицы, наблюдается некоторое увеличение $\langle \beta_\lambda \rangle$ с ростом концентрации горючего, которое можно не принимать во внимание из-за погрешностей измерений, достигающих 50% для $\langle \beta_\lambda \rangle$. В этом не сложно убедиться из анализа погрешностей измерений использованных при определении $\langle \beta_\lambda \rangle$ физических величин. С учетом выше сказанного коэффициент поглощения можно принять равным: $\langle \beta_\lambda \rangle = (4.5 \pm 2.2) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2$. Соответствующий ему осредненный фактор (фактически спектральная испускательная способность частиц иногда называемый коэффициентом черноты): $\langle Q_a \rangle \approx 1.6 \pm 0.8$. Полученный результат мы отнесли к частицам Fe_3O_4 , учитывая при этом отличие их радиуса от радиуса частиц железа.

Как видно полученную величину $\langle Q_a \rangle$ в пределах погрешностей измерений можно принять равной единице, если считать ее предельно допустимой. Однако, как следует относиться к величинам $Q_a > 1$? Выше уже упоминалось, что при решении задач о переносе излучения в излучающих, поглощающих и рассеивающих дисперсных системах факторы эффективности поглощения и испускательная способность частицы принимаются равными. Это равенство интерпретируется как закон Кирхгофа для излучения и поглощения произвольной сферической частицей. В таком случае приходится сталкиваться со сферическими частицами с факторами эффективностями поглощения, превышающими единицу. Однако, если Q_a может быть больше единицы, то и излучательная способность может быть больше единицы. В этом заключается суть «парадокса». Разъяснение ему дается в монографии [7]. А поскольку сделано это весьма убедительно, и в силу исключительной важности этого вопроса, приведем цитату из этой книги. «... это наносит сильный удар по глубоко укоренившимся предрассудкам, касающимся верхнего предела, которого может достигать истинная излучательная способность; на первый взгляд тот факт, что излучательная способность больше единицы, означает, что частица излучает больше, чем «абсолютно черная частица». Но что такое «абсолютно черная частица»? Общепринятое определение абсолютно черного тела состоит в том, что это тело поглощает весь падающий на него свет. Понятие света, геометрически падающего на тело, является геометрооптическим, и оно теряет свою силу для частиц с размерами, сравнимыми или меньшими, чем длина волны. На это было указано еще Планком, который писал, что «при дальнейшем анализе будем предполагать, что ... радиусы кривизны всех рассматриваемых поверхностей велики по сравнению с длинами волн имеющих лучей». Кирхгоф тоже отдавал себе полный отчет в ограниченности своего вывода. К сожалению, как это часто бывает в физике, каждый новый автор все больше отходит от первоисточника теории и

склонен упускать тонкости, касающиеся ее применимости. Когда «парадокс» рано или поздно разрешается, камни почему-то летят в теорию, тогда как истинной мишенью для них являются те, кто огульно использует ее, находясь в состоянии блаженного неведения относительно налагаемых на эту теорию ограничений.». Для частиц, размеры которых велики по сравнению с длиной волны, что имеет место в нашем случае, определение излучательной способности частицы согласуется с элементарными представлениями об излучательной способности тела. Сказанное иллюстрирует рис.3, на котором представлены результаты вычислений $\langle Q_a \rangle$ для частиц Fe_3O_4 с параметрами функции распределения из табл.1 в зависимости от мнимой части показателя преломления. Видно, что $\langle Q_a \rangle$ для типичных значений χ выходит на насыщение и не превышает единицы.

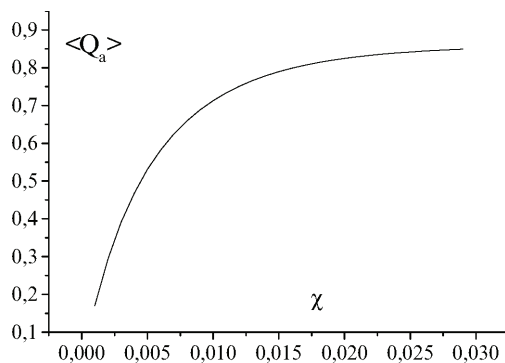


Рис. 3. Факторы эффективности поглощения продуктов сгорания Fe_3O_4 во фронте факела осредненные по функции распределения (табл.1)

Выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что температуры, реализующиеся в ламинарном диффузионном факеле частиц железа (около 1800К-1900К) недостаточны для перевода горения индивидуальных частиц в газофазный режим, необходимый для образования наночастиц продуктов сгорания. При этом увеличение температуры в зоне горения за счет увеличения массовой концентрации горючего оказывается незначительным.

Роль излучения в тепловом балансе ЛДДФ железа сводятся к теплотерям. Теплотери излучением из зоны горения ЛДДФ железа не зависят от массовой концентрации горючего и составляют около 30% от тепловыделения в результате химической реакции. Высокие теплотери при относительно невысоких температурах горения объясняются большими значениями факторов эффективности поглощения частиц горючего, которые для усло-

вий реализующихся в ЛДДФ железа можно принять равными единице, что существенно облегчает решение задачи о переносе излучения в подобных дисперсных системах.

Литература

1. Золотко А.Н., Вовчук Я. И., Полетаев Н. И., Флорко А. В, Альтман И. С.: Синтез наноксидов в двухфазных ламинарных пламенах. Физика горения и взрыва, 1996, т. 32, №3, с.24-34.
2. Poletaev N. I, Zolotko A. N., Florko A.V., Vovchuk J. I., Nazarenko A.A. Combustion Synthesis and Investigation of Metal Oxide Nanopowders Properties. Chemical Engineering — A Key Technology Serving Mankind, Proceeding of 3rd European Congress of Chemical Engineering, Nuremberg, June 26-28, 2001
3. Флорко И.А., Полетаев Н. И., Флорко А. В. Теплообмен излучением в горящих дисперсных системах. Физика аэродисперсных систем, Межведомственный научный сборник, ТЕПЛОМАССООБМЕН, Одесса, «Астропринт» 2001, вып. 38, с. 178-188
4. Флорко И. А., Флорко, А. В., Швец А. И. Влияние аппаратных искажений на результаты измерения температуры по абсолютным интенсивностям резонансных линий. Физика аэродисперсных систем, Межведомственный научный сборник, Одесса, «Астропринт» 2002, вып. 39, с. 87-94
5. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Спр. под ред. В. П. Глушко, т. 1-3, М.: Наука, 1981.
6. Poletaev N. I., Vovchuk J. I. Particularities of the Laminar Diffusion Dust Flames. Proceedings of International Conference on Combustion and Detonation. Zel'dovich Memorial II, August 30 — September 3, 2004, Moscow, Russia, CD version, PP11-5
7. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир. 1986. — 660 с
8. Агеев Н. Д., Вовчук Я. И., Горошин С. В., Золотко А. Н., Полетаев Н. И. Стационарное горение газовзвесей твердых горючих. Ламинарный диффузионный факел. Физика горения и взрыва, 1990, т. 26, № 6, с.54-62.

В. В. Головка, М. І. Полетаєв, О. В. Флорко

**Роль випромінювання в тепловому балансі ламінарного
дифузійного факела заліза**

АНОТАЦІЯ

У роботі наведено результати спектральних досліджень зони горіння ламінарного дифузійного факела частинок заліза. Показано, що температура в зоні горіння факела слабо залежить від масової концентрації частинок пального. Частинки заліза в умовах дифузійного факела горять гетерогенно. Продукти згорання мають кристалічну фазу магнетиту (Fe_3O_4). Роль випромінювання зводиться до втрат тепла із зони горіння, які складають близько 30% від загального тепловиділення хімічної реакції і в межах похибки вимірювань не залежать від масової концентрації пального. Високі тепловтрати при відносно невисоких температурах горіння пояснюються великими значеннями факторів ефективності поглинання частинок заліза.

Golovko V. V., Poletaev N. I., Florko A. V.

**The influence of radiation on heat balance of the laminar diffusive
dust flame of the iron particles**

SUMMARY

The results of spectral researches of combustion zone of laminar diffusion flame of iron particles are presented. It is shown that a temperature in the combustion zone of such flame poorly depends on mass concentration of fuel. The particles of iron in the conditions of diffusion dust flame burn heterogeneous. The combustion products have the crystalline phase of magnetite (Fe_3O_4). The role of radiation is taken to the losses of heat from the combustion zone, which make about 30% from common heat release of chemical reaction and within the limits of measure errors does not depend to mass concentration of fuel. The loss of heat at the relatively low temperatures of combustion is explained by the large values of factors of iron particles absorption efficiency.