

СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ДИФФУЗИОННОГО ФАКЕЛА В ТРУБЧАТОМ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩЕМ МОДУЛЕ

Национальным техническим университетом Украины «Киевский политехнический институт» (НТУУ «КПИ») на основе опыта создания струйных и диффузионно-стабилизаторных методов сжигания газообразного топлива [1] разработана трубчатая технология сжигания газа, не имеющая аналогов в топочной технике¹. Особенностью данной технологии является применение трубчатых элементов стабилизации и интенсификации горения факела на базе использования прямого цилиндрического канала с внезапным расширением потока (насадка Борда) [2, 3].

Выполненные исследования и разработки [3-6] указывают на перспективность применения трубчатых горелок как в топливосжигающих устройствах стехиометрического типа (топки котлов и автономных теплоцентров), так и в устройствах, работающих при высоких и переменных избытках воздуха (камеры сгорания ГТУ и ПГУ, топки промышленных теплогенераторов широкого назначения).

Однако база данных [2, 3], определяющая особенности организации сжигания топлива в трубчатых топливосжигающих модулях, не обеспечивает эффективного решения задач универсального использования данной технологии в тепловых энергоустановках различного

¹ Данная технология разработана при участии ОАО «Укргазпроект», Института газа НАН Украины и Корпорации технологий энергосбережения («КОРТЕЗ», г. Киев).

назначения. Это, прежде всего, относится к недостаточной изученности закономерностей развития и формирования структуры факела при горении топлива в трубчатом модуле (рис.1 а).

Исследования [2] структуры и особенностей развития диффузионного факела в трубчатом модуле проведены при использовании укороченного модуля при низком уровне скорости в воздушном канале (~20 м/с) в условиях развития газового факела в неограниченном воздушном пространстве при наличии внешнего тепломассообмена.

Между тем, в реальных условиях работы горелочных устройств факел развивается в ограниченном стенками объеме топочной камеры, где внешний тепломассообмен практически исключен, а также при более высоких аэродинамических форсировках зоны горения.

Задача исследования структуры и закономерностей развития диффузионного факела решалась в условиях, близких к реальным, методом физического моделирования зоны горения, которая формировалась в трубчатом модуле с полноразмерной насадкой в широком диапазоне изменения скоростей воздуха (от 30 до 60 м/с).

Схема рабочего участка экспериментального стенда показана на рис. 1 а. Основным его элементом является одиночный трубчатый модуль (8), в центральный канал которого (диаметром $d_1=16,5$ мм) подводится воздух, а в топливный коллектор (5) подается природный газ. На срезе трубчатого модуля установлена трубка из кварцевого стекла с внутренним диаметром $d_2=45$ мм, обеспечивающая необходимое внешнее ограничение факела и его визуализацию.

На начальной стадии испытаний использовалась трубка длиной 360 мм с последующей заменой ее на трубку длиной 410 мм. Подача топлива в зону смесеобразования и горения осуществляется с помощью системы топливных отверстий (6 отверстий диаметром $d_1=2$ мм), расположенных на торцевой стенке трубчатого модуля (на радиусе 15,5 мм).

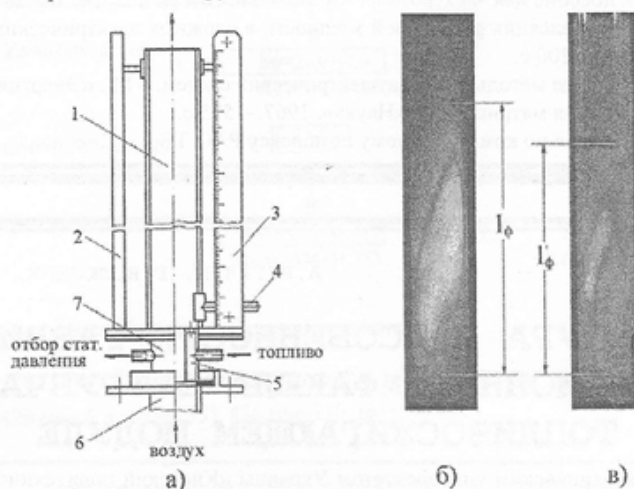


Рис. 1. Схема рабочего участка экспериментального стенда (а) и фотографии факелов при наличии (б) и отсутствии (в) внешнего освещения

- 1 – кварцевая трубка (Ø50/45); 2 – стойка крепежная; 3 – измерительная шкала;
- 4 – патрубок для ввода электрического воспламенителя; 5 – топливный коллектор;
- 6 – воздушный патрубок; 7 – трубчатый топливосжигающий модуль

Экспериментальный стенд оснащен соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой, позволяющей фиксировать температуру воздуха (T_a , К) и топливного газа (T_r , К), а также другие параметры, необходимые для определения расхода воздуха (m_a , г/с) и топлива (m_r , г/с).

Исследования проведены на холодном воздухе при температуре $T_a=(285...302)$ К ($t_a=12...29^\circ\text{C}$), при давлении, близком к атмосферному ($p_a \approx 10^5$ Па), в широком диапазоне изменения скорости воздуха в воздушном канале модуля ($W_{в.к} \approx 30...60$ м/с). При реализованном уровне скоростей воздуха удельная аэродинамическая форсировка сечения канала воздушной трубки ($F_a = \pi \cdot d_1^2 / 4$), определяемая из соотношения $q_{F(app)} = 10^3 \cdot m_a \cdot (F_a p_a)^{-1}$, изменялась в диапазоне

$(3,57...7,14) \cdot 10^{-4}$ кг/Па·с, а тепловое напряжение сечения трубчатого модуля варьировалось в диапазоне $q_F = 0,017...0,207$ кВт/(м²·Па)².

Воспламенение диффузионного факела осуществлялось с помощью электроскорового запальника, который вводился в затененную зону модуля через патрубок (4), показанный на рис. 1 а.

После воспламенения факела и вывода запальника из патрубка (4) и герметизации бокового разреза устанавливался необходимый расход воздуха, соответствующий заданному уровню скорости ($W_{\text{в}} \approx 30, 40$ или 60 м/с) во внутреннем канале трубчатого модуля (7), и при различных расходах топливного газа осуществлялся визуальный анализ структуры диффузионного факела и фиксирование его формы и структуры с помощью цифровой фотокамеры.

Результаты исследований диффузионного факела в трубчатом топливосжигающем модуле показали, что, как и в случае развития факела с укороченной насадкой Борда [2], он имеет на форсированных режимах (несмотря на дискретную подачу топлива в вихревую зону) замкнутую полую структуру (рис. 1 в). Зона выгорания факела формируется в пограничном слое воздушной струи, истекающей из центрального (воздушного) канала модуля, дальность (или длина) факела (l_{ϕ}) изменяется с изменением расхода топливного газа (см. рис. 2), а в теневой зоне за торцевой стенкой модуля образуется тороидальное вихревое течение, являющееся источником стабилизации факела.

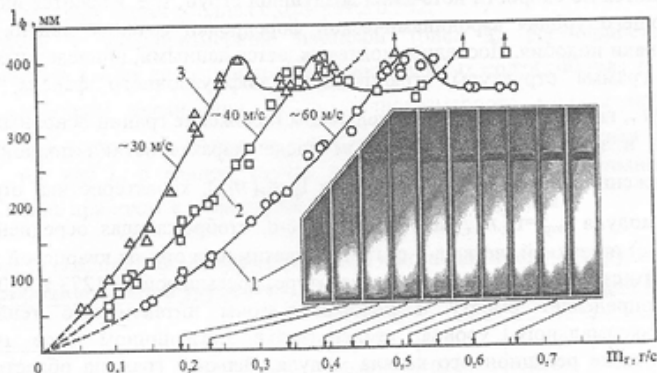


Рис. 2. Влияние расхода топлива и скорости воздуха в воздушном канале на видимую длину диффузионного факела: 1, 2 и 3 – характеристики полной (видимой) длины факела $l_{\phi} = f(m_r)$ при различных уровнях скорости воздуха во внутреннем канале модуля

Как и в случае факела с укороченной насадкой Борда [2], на всех режимах (по скорости истечения топлива из газовых отверстий) факел в трубчатом модуле с полноразмерной насадкой Борда имеет турбулентную структуру, что определяется турбулентным режимом истечения воздушной струи, для которой в исследованном диапазоне скоростей число Рейнольдса ($Re = W_{\text{в.к}} \cdot d_1 / \nu$) изменялось в диапазоне $Re \approx (3,2...6,4) \cdot 10^4$. При этом, как и в случае частично ограниченного факела [2], зафиксированы режимы, на которых имеет место отрыв факела от торцевой стенки модуля и величина отрыва ($l_{\text{отр}}$) практически линейно возрастает с увеличением расхода топлива.

Существенной особенностью развития факела в полноразмерном модуле (рис. 1), в сравнении с факелом, развивающимся в модуле с укороченной насадкой [2], является отсутствие четких его границ.

Как видно из рис. 1, факел состоит из двух частей: внутреннего светящегося ядра высотой l_{ϕ} (рис. 1-в) и наружной «размытой» оболочки высотой $\Delta l_{\phi} = l_{\phi} - l_{\phi}^*$ (рис. 1 в). Толщина «размытой» области факела (Δl_{ϕ}) существенно возрастает при увеличении расхода топлива, что иллюстрируется данными, представленными на рис. 3, где отображена диаграмма структуры

² Тепловое напряжение сечения определялось из соотношения $q_F = V_r \cdot Q_{\text{в}} / (3600 \cdot F_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{г}})$, где $V_r = 3,6 \cdot m_{\text{г}} / \rho_{\text{г}}$ – объемный расход топливного газа в трубчатом модуле (м³/ч); $\rho_{\text{г}}$ – плотность топливного газа (в расчетах принято $\rho_{\text{г}} = 0,715$ м³/с); $Q_{\text{в}}$ – теплота сгорания 1 м³ природного газа (в расчетах принято $Q_{\text{в}} = (4,19 \times 8500)$ кДж/м³).

факела, характеризующая автомодельность основных его характеристик, если использовать в качестве определяющего фактора относительный расход топливного газа ($\bar{m}_r = m_r/m_n$).

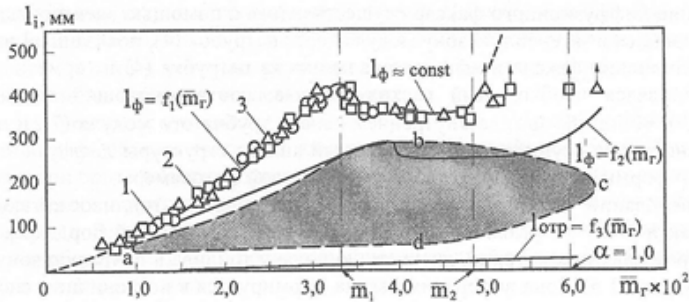


Рис.3. Диаграмма структуры диффузионного факела: 1 - $W_b \approx 60$ м/с; 2 - $W_b \approx 40$ м/с; 3 - $W_b \approx 30$ м/с

Выполненными исследованиями установлено, что характеристики дальности факела $l_\phi = f(\bar{m}_r)$ распадаются по скорости истечения воздушной струи, т. е. являются индивидуальными для соответствующего уровня аэродинамической форсировки сечения модуля и имеют явно выраженные признаки подобия. Последнее подтверждается данными, приведенными на рис. 3, где представлена диаграмма структуры ограниченного диффузионного факела, построенная в координатах $l_i - \bar{m}_r$, где l_i – ордината, определяющая положение границ основных характеристик структуры факела и зоны его развития, в том числе: характеристики полной длины факела $l_\phi = f_1(\bar{m}_r)$ и протяженности его внутреннего ядра $l'_\phi = f_2(\bar{m}_r)$, характеристика отрыва факела от торцевой стенки модуля $l_{отр} = f_3(\bar{m}_r)$ и область a-b-c-d, отображающая осредненное положение нижней (ветвь a-d-c) и верхней (ветвь a-b-c) границ светимости стенок кварцевой трубки. Так как свечение кварцевого стекла возникает при температуре, превышающей 1273 К (1000° С), поэтому данная область определяет высоту и положение зоны интенсивного тепловыделения, а следовательно, максимального уровня температур в пограничном слое горячей струи, примыкающей к стенке реакционного канала модуля. Верхняя граница области свечения при $\bar{m}_r < \bar{m}_2$ практически совпадает с верхней границей ядра факела, а наибольшая высота этой области наблюдается в диапазоне $\bar{m}_1 < \bar{m}_r < \bar{m}_2$.

Возможность использования обобщенного параметра \bar{m}_r при анализе условий развития факела в трубчатом модуле также подтверждается выводами работы [7]. В данной работе исследованы условия формирования и выгорания факела природного газа за диффузионно-стабилизаторными топливосжигающими модулями, выполненными в виде полых плоских или уголкового стабилизаторов постоянной ширины (В), установленных в потоке окислителя с постоянным шагом (t), с торцевых (затененных) стенок которых осуществляется струйная подача топлива в зону рециркуляции. В результате обобщения опытных данных установлена закономерность воздействия на относительную длину выгорания факела ($\bar{l}_{\phi, в} = l_{\phi, в}/В$) при фиксированном уровне химического недожога ($q_3 = \text{const}$) относительного расхода газа (\bar{m}_r) и коэффициента загромождения модуля (K_F), связанного с безразмерным геометрическим параметром модуля $n = В/t$ соотношением $K_F = (1-n)$. Эта закономерность описывается представленным ниже уравнением

$$\bar{l}_{\phi, в} = \frac{\ln q_3 \cdot \bar{m}_r}{K_F \cdot (1 - K_F)} \quad (1)$$

Из уравнения (1) вытекает, что при $q_3 = \text{const}$ протяженность (длина) зоны выгорания факела пропорциональна комплексному параметру $\bar{m}_r / [K_F \cdot (1 - K_F)]$.

Принимая во внимание тот факт, что диффузионно-стабилизаторные и трубчатые топливосжигающие модули основаны на общем принципе организации сжигания топлива и их отличительной особенностью является только геометрическая форма образованных ими диффузионных факелов (плоские или осесимметричные), а также отмеченную общность

воздействия относительного расхода топлива (\bar{m}_r) на протяженность зоны горения, можно предположить, что дальностью факела в трубчатых модулях определяется аналогичным комплексным параметром $\bar{m}_r/[K_{Fi}(1-K_{Fi})]$. На основе использования данного комплексного параметра возможно сравнение характеристик относительных дальностей трубчатых факелов, отличающихся различными геометрическими размерами и конструкцией модулей, а также различными уровнями скоростей воздушной струи.

При таком сравнении относительную дальность факела целесообразно определять в калибрах диаметра воздушного канала, т.е. $\bar{l}_\phi = l_\phi/d_1$, а при оценке геометрического параметра модуля (n) использовать очевидное соотношение $n=(d_1/d_2)^2$, определяющее, как и для линейного элемента стабилизации и интенсификации горения, степень раскрытия воздушного канала.

При непосредственном сопоставлении экспериментальных характеристик дальности $\bar{l}_\phi = f_1(\bar{m}_r)$, полученных для разных типов модулей (рис. 3 и табл. 1) можно сделать следующие выводы:

- для модуля с укороченной насадкой (табл. 1) характеристика $l_\phi = f_1(\bar{m}_r)$ является регулярной, так как она определяет непрерывное изменение дальности факела во всем исследованном диапазоне относительных подач топлива $0,028 \leq \bar{m}_r \leq 0,232$;
- для модуля с полноразмерной насадкой (рис. 3) регулярность характеристики дальности наблюдается лишь при уровне относительных подач топлива $\bar{m}_r < 0,033$;
- при последующем увеличении \bar{m}_r у полноразмерного модуля наблюдается кризис дальности и в интервале подач $\bar{m}_1 < \bar{m}_r < \bar{m}_2$ (рис. 3) характеристика $l_\phi = f_1(\bar{m}_r)$ является автомодельной, так как l_ϕ в данном случае является практически постоянной, а дальнейшее увеличение \bar{m}_r вновь приводит к возрастанию дальности факела.

Таблица 1

Режимы исследований и характеристики дальности диффузионного факела природного газа в трубчатом модуле с укороченной насадкой Борда¹

Параметр	Размерность	РЕЖИМ					
		1	2	3	4	5	6
Относительный расход газа, \bar{m}_r	г/с	0,028	0,032	0,053	0,134	0,189	0,232
Коэффициент избытка воздуха ² , α		2,12	1,86	1,12	0,44	0,31	0,25
Число Рейнольдса, Re_r		$2,2 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$	$10,2 \cdot 10^3$	$14,3 \cdot 10^3$	$18,2 \cdot 10^3$
Высота факела, l_ϕ	мм	130	150	200	375	550	675
Относительная дальность факела, $\bar{l}_{\phi(2)}$		3,61	4,17	5,56	10,42	33,33	18,75
Соотношение дальностей ³ , $\bar{l}_{\phi(1)}/\bar{l}_{\phi(2)}$		7,17	7,77	3,92			

Примечания:

1. Трубчатый модуль с укороченной насадкой Борда: высота насадки $h_0=41,5$ мм, $(d_1/d_2)=36/110$, $n=(d_1/d_2)^2=0,1$, число газовых отверстий $z_r=6$ при их диаметре $d_r=3$ мм, скорость воздуха $W_a \approx 19$ м/с, число Рейнольдса воздушной струи $Re_a \approx 4,6 \cdot 10^6$;

2. Коэффициент избытка воздуха определен с учетом подачи воздуха через внутренний канал модуля (внутренняя диффузия) без учета внешней диффузии воздуха к зоне развития факела. 3

3. Числитель – дальность факела в полноразмерном модуле, знаменатель по данным [2].

Для регулярных режимов развития диффузионных факелов в трубчатых модулях можно получить обобщенные характеристики дальности на основе уравнения (1) с учетом практического постоянства на границе этих факелов уровня химического недожога топлива ($q_3=\text{const}$).

Проведенный регрессионный анализ позволил аппроксимировать экспериментальные данные степенной функцией

$$\bar{l}_{\phi,i} = a_i \cdot \left[\bar{m}_r \cdot K_{Fi} (1 - K_{Fi}) \right]^{b_i}, \quad (2)$$

где a_i и b_i – константы аппроксимации и показатели степени уравнения регрессии (2);

K_{Fi} – геометрические параметры сравниваемых модулей.

При этом получено: для полноразмерного модуля, у которого $K_{Fi}=1,59$, $a_1 \approx 4,8 \cdot 10^3$, $b_1 \approx 1,35$ при дисперсии 1,09 (с уровнем доверительной вероятности $P=0,95$ и коэффициенте корреляции

$R=0,99$); для модуля с укороченной насадкой, у которого $K_{F2}=1,69$, $a_2 \approx 78,35$ при дисперсии 1,06 (с уровнем доверительной вероятности $P=0,95$ и коэффициенте корреляции R , близким к 1,0).

Из уравнения регрессии (2) следует, что степень воздействия относительного расхода топлива (\bar{m}_r) на дальность факела в полноразмерном модуле выше, чем в модуле с укороченной вставкой ($\Delta b=b_1-b_2=0,6$).

С использованием уравнения регрессии (2) проведено сопоставление относительных дальностей факелов для двух типов трубчатых модулей на основе соотношения $\bar{l}_{\phi(1)}/\bar{l}_{\phi(2)} = (a_1/a_2) \cdot \bar{m}_r^{0,6} \{ [(K_{F2} \cdot (1 - K_{F2}) / [K_{F1} \cdot (1 - K_{F1})])^{0,6}$. Результаты полученных оценок приведены в табл. 1 для режимов 1 и 2, соответствующих регулярной области развития факелов. Для режима 3 при оценке соотношения $\bar{l}_{\phi(1)}/\bar{l}_{\phi(2)}$ приняты экспериментальные значения показателей дальности, причем для полноразмерного модуля принято $\bar{l}_{\phi(1)}=21,8$, что соответствует автомодельной области развития факела. В обогащенной области развития полноразмерного диффузионного факела на режимах 4, 5 и 6 оценка $\bar{l}_{\phi(1)}$ не имеет физического смысла. Из выполненных оценок видно, что дальность факела в полноразмерном модуле во много раз превышает соответствующий показатель для модуля с укороченной насадкой.

Существенное увеличение дальности ограниченного факела вызвано следующими причинами: отсутствием внешней диффузии окислителя в зону горения; ускорением течения в ограниченном стенками реакционном объеме модуля по причине тепловыделения. Этому может способствовать возможная ламинаризация течения в хвостовой части факела в связи с тепловыделением и высокой адиабатичностью реакционной зоны.

Установленный факт автомодельности характеристик дальности в трубчатом модуле от относительного расхода топлива (\bar{m}_r) на регулярном, переходном и автомодельном режимах развития факела позволяет значительно расширить возможности анализа условий формирования факела в полноразмерных модулях в связи с возможностью использования очень важного для решения практических задач параметра воздействия на l_ϕ – коэффициента избытка воздуха (α), который связан с относительным расходом топлива балансным соотношением $\alpha = (L_0 \cdot \bar{m}_r)^{-1}$, где L_0 – стехиометрический коэффициент.

Возможности использования коэффициента избытка воздуха в качестве фактора, определяющего условия развития факела в трубчатом модуле, показаны на рис. 4.

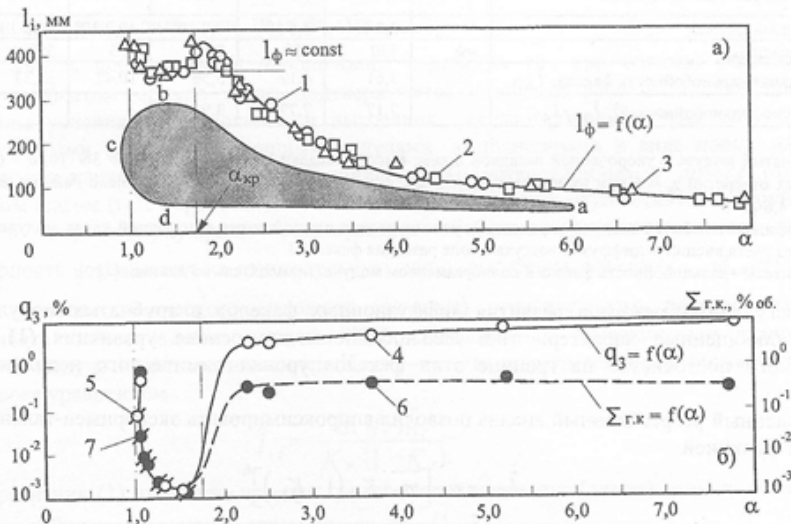


Рис. 4. Сравнение характеристик дальности и интенсивности тепловыделения (а) с характеристиками химической неполноты сгорания (б) диффузионного факела:

1 – $W_s \approx 60$ м/с; 2 – $W_s \approx 40$ м/с; 3 – $W_s \approx 30$ м/с;

4 и 6 – q_3 и $\Sigma_{г.к.}$, определенные с помощью хроматографа «ГАЗОХРОМ»;

5 и 7 – концентрация CO , определенная с помощью газоанализатора TESTO 30

Как видно, представленные на рис. 4-а характеристика полной дальности факела $l_\phi=f(\alpha)$ и контуры области a-b-c-d, отображающей осредненное положение нижней (ветвь a-d-c) и верхней (ветвь a-b-c) границ светимости стенок кварцевой трубки, имеют обращенную форму в сравнении с аналогичными характеристиками на рис. 3.

При рассмотрении характеристики дальности факела $l_\phi=f(\alpha)$ обращает на себя внимание очень важную для практического применения трубчатых модулей особенность их рабочего процесса – широкий диапазон устойчивого сжигания топлива по коэффициенту избытка воздуха: от α , близких к 1,0 и менее, до α , приближающихся к 10. Данное свойство трубчатой технологии сжигания топлива является уникальным в сравнении с другими известными технологиями сжигания топлива.

Совместный анализ характеристики полной высоты факела $l_\phi=f(\alpha)$ и области светимости a-b-c-d боковой поверхности кварцевой трубки модуля позволяет объяснить ряд специфических особенностей формирования диффузионного факела на всех характерных режимах его развития. Это относится, прежде всего, к регулярному режиму развития факела, который имеет место при $\alpha > \alpha_{кр}$.

В этом случае форма характеристики дальности факела $l_\phi=f(\alpha)$ и положение правой ветви верхней границы (b – a) зоны светимости кварцевой трубки модуля являются подобными, а высота ядра факела $l_\phi=f(\alpha)$ практически совпадает с верхней границей (b – a) светимости кварцевой трубки. Все это является косвенным подтверждением высказанного выше предположения о существенном влиянии тепловыделения на увеличение дальности ограниченного факела.

Более того, наличие зоны интенсивного тепловыделения в ядре факела объясняет размытость его верхней границы и существование внешней оболочки, светимость которой меньше светимости ядра по причине существенного снижения концентраций горючих газов и гомогенизации структуры зоны горения в верхней части факела. Последнее обстоятельство является дополнительной причиной «растягивания» высоты факела.

Аппроксимация опытных данных, описывающих воздействие коэффициента избытка воздуха на относительную высоту характерных зон развития факела позволила получить уравнения регрессии в виде полиномов второй степени как для полной длины факела

$$\bar{l}_\phi = 1 + 14 \cdot \alpha^{-1} + 61 \cdot \alpha^{-2} \pm 0,61,$$

так и для его ядра

$$\bar{l}_\phi = -1 + 34 \cdot \alpha^{-1} - 9 \cdot \alpha^{-2} \pm 0,58$$

при степени корреляции для обоих случаев $R=0,99$.

Полученные уравнения регрессии позволяют оценить воздействие избытка воздуха на высоту слабосветящейся зоны факела $\Delta \bar{l}_\phi = (l_\phi - l_\phi^0)/d_1$ с помощью соотношения

$$\Delta \bar{l}_\phi = 2 + 20 \cdot \alpha^{-1} + 70 \cdot \alpha^{-2},$$

форма которой указывает на увеличение высоты наружной оболочки факела с уменьшением коэффициента избытка воздуха, а, следовательно, и с увеличением тепловыделения в зоне развития факела в области $\alpha < \alpha_{кр}$ (см. рис. 3 а).

При $\alpha > \alpha_{кр}$ имеет место кризис дальности, появление которого можно объяснить двумя причинами:

1) Одной из них может быть воздействие кинетического фактора в результате роста уровня тепловыделения в зоне развития факела и увеличения температуры реакционной зоны, что в соответствии с законом Аррениуса приводит к возрастанию скорости сгорания топлива. Косвенным подтверждением роста уровня тепловыделения является достижение максимальной высоты поверхности свечения кварцевой трубки при $\alpha \rightarrow \alpha_{кр}$ (рис. 4 а).

2) Второй причиной появления кризиса дальности может быть действие диффузионного фактора, заключающегося в ускорении массообменных процессов по высоте развития факела за счет дополнительной генерированной пламенем турбулентности (эффект Карловитца [8]).

Возникновение автономной области развития факела в области $1,0 < \alpha < \alpha_{кр}$, где его полная длина остается практически постоянной, можно объяснить установившимся равновесием темпа роста скорости сгорания и темпом роста подачи топлива в трубчатый модуль.

Последнее обстоятельство подтверждается результатами исследований [9] характеристик выгорания топлива в полноразмерном трубчатом модуле с геометрическими характеристиками:

$(d_1/d_2)=36/70$, $n=(d_1/d_2)^2=0,264$ при числе газовых отверстий $z_r=6$, их диаметре $d_r=3$ мм и скорости истечения воздуха из внутреннего канала $W_p \approx 30$ м/с, приведенными на рис. 4-б и в табл. 2.

Таблица 2

Результаты диагностики состава горючих газов в продуктах сгорания диффузионного трубчатого модуля

Параметр	Режим ¹								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент избытка воздуха, α	1,05	1,07	1,1	1,54	2,27	2,46	3,64	5,14	7,81
Оксид углерода (CO), % об	0,028	0,008	0,048	0,001	0,21	0,16	0,35	0,38	0,28
Водород, (H ₂), % об			0,003		0,21	0,16	0,35	0,38	0,28
Метан (CH ₄), % об			0,032		0,066	0,012	0,027	0,03	0,025
Сумма горючих $\Sigma_{г.к}$, % об.	0,028	0,008	0,083	0,001	0,35	0,25	0,037	0,41	0,305
Химический недожоg q_3 , %	0,085	0,009	0,0025	0,0015	3,15	3,14	4,43	6,85	7,73

Примечание. Режимы 1, 2 и 4 выполнены при использовании газоанализатора TESTO 30, а остальные – при использовании газоанализатора «ГАЗОХРОМ»

В данной работе диагностика состава продуктов сгорания природного газа проведена на экспериментальной установке, состоящей из полноразмерного трубчатого модуля и теплоизолированного тоннеля с огнеупорной внутренней жаростойкой футеровкой. Рабочее пространство тоннеля объемом ~0,024 м³ выполняло функции адиабатического реактора дожигания компонентов химического недожога топлива. В результате отбора продуктов сгорания водоохлаждаемым газоотборником с помощью газоанализаторов «ГАЗОХРОМ» и TESTO 30 определялся объемный состав продуктов химического недожога, их суммарная концентрация $\Sigma_{г.к} = H_2 + CO + CH_4$, а величина химической неполноты сгорания q_3 определялась в соответствии с рекомендациями [10].

Как видно из результатов диагностики продуктов сгорания, приведенных на рис. 4 б, именно в данной области зафиксирован минимум $\Sigma_{г.к}$ и соответствующий этому уровню минимальный химический недожоg топлива (q_3).

Возрастание дальности факела при достижении стехиометрического соотношения между топливом и воздухом ($\alpha \rightarrow 1,0$) можно объяснить снижением действия кинетического фактора в связи с балластировкой его оболочки продуктами сгорания, уменьшением концентрации кислорода в этой зоне и снижением ее температурного уровня по причине роста химического недожога топлива, что также подтверждается результатами диагностики, приведенными на рис. 4 б.

При рассмотрении обогащенного топливом режима горения ($\alpha < 1,0$) понятие дальности факела теряет физический смысл. Однако такой режим имеет практическое применение в топочной технике при работе факельных воспламенителей и при горении обогащенного факела возможна реализация стадийного горения в качестве эффективного метода снижения эмиссии токсичных оксидов азота (NOx) в продуктах сгорания основных горелочных устройств. Возможность стабильного сжигания топлива при $\alpha < 1,0$ (табл. 1) определяет перспективность их применения при создании факельных воспламенителей.

Выводы

Выполненные исследования условий формирования и развития диффузионного факела природного газа в изолированном трубчатом топливосжигающем модуле, а также результаты их анализа указывают на существование четырех характерных режимов развития факела, в числе которых можно выделить:

- регулярный режим, который реализуется в диапазоне низких избытков воздуха ($0 \leq \alpha < 1,8$) и характеризуется возрастанием дальности факела с уменьшением коэффициента избытка воздуха, причем зависимость $\bar{l}_f = f(\bar{m}_r)$ имеет степенной характер;
- переходный режим, который характеризуется появлением кризиса дальности факела при условии $\alpha \sim 2,0$;
- автомобильный режим, возникающий при дальнейшем уменьшении коэффициента избытка воздуха и в диапазоне $1,0 < \alpha \leq 1,8$ дальность факела (\bar{l}_f) практически остается постоянной ($\bar{l}_f \approx 21,8$);
- стехиометрический режим, возникающий при $\alpha \rightarrow 1,0$ и переходящий при дальнейшем

снижении избытка воздуха в режим горения обогащенного факела, где понятие дальности факела теряет физический смысл.

Характер зависимости $\bar{l}_\phi = f(\bar{m}_r)$ для первых трех режимов при развитии факела в трубчатом модуле аналогичен виду характеристики $\bar{l}_\phi = f(W_r)$ при горении струи углеводородного топлива в свободном воздухе (Хоттел и Гаусорн [8]). Однако такая аналогия является формальной, так как появление ламинарного, переходного и турбулентного режимов горения свободного диффузионного факела обусловлено гидродинамикой истечения струи топлива, а в случае развития диффузионного факела в трубчатом модуле возникновение первых трех режимов обусловлено совместным действием кинетических и диффузионных факторов, а турбулентный характер развития ограниченного факела обусловлен турбулентностью воздушной струи ($Re_\phi \approx (3,2 \dots 6,4) \cdot 10^4$).

Существование различных режимов стабильного развития факела в трубчатом модуле является подтверждением универсальности трубчатой технологии сжигания газа, которая может быть реализована в широком диапазоне изменения избытков воздуха (от $\alpha < 1,0$ до $\alpha \rightarrow 7,0$ и более).

Литература

1. Любчик Г.Н. Разработки НИО проблем горения НТУУ «КПИ» в направлении создания передовых технологий сжигания топлив // Энергетика: економіка, технології, екологія. - 2006. - № 1. - С. 83-92.
2. Любчик Г.Н., Микулин Г.А., Варламов Г.Б., Левчук С.А., Зарицкий А.А., Ольховская Н.Н. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей // Технологические системы. - 2002. - Вып. 1, №2 (13). - С. 130-133.
3. Микулин Г.С., Любчик Г.М., Варламов Г.Б., Марченко Г.С., Микулин Г.С., Левчук С.А., Зарицкий А.А., Кардашов А.В. Використання трубчастих модулів як елементів інтенсифікації горіння та підвищення енергоекологічної ефективності газових пальників // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2003. - №4. - С. 58-65.
4. Любчик Г.М., Марченко Г.С., Варламов Г.Б., Микулин Г.О., Макаренко В.В., Левчук С.О. Емісійні характеристики пальників на базі трубчастих модулів // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2004. - №1. - С. 73-79.
5. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Микулин Г.А., Левчук С.А. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 2003. - №2. - С. 65-74.
6. Говдяк Р.М., Любчик Г.Н., Чабанович Л.Б., Гринник О.Г., Шелковский Б.И. Резерви енерго-ресурсозбереження і нові технології для використання на компресорних станціях магістральних газопроводів // Нафтогазова енергетика. - 2007. - № 2 (3). - С. 35-45.
7. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христич В.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени / В сб. Теория и практика сжигания газа. - Л.: Недра. - 1975. - С.324-338.
8. Основы горения углеводородных топлив / Под ред. Л.Н.Хитрина и В.А. Попова. - М.: И.-Л. - 1960. - 663 с.
9. Микулин Г.А. Трубчатая технология сжигания топлива и основы ее эффективного применения в тепловых энергоустановках / Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук. - К.: НТУУ «КПИ». - 2006.
10. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. - М.: Наука. - 1971. - 357 с.