

СЖИГАНИЕ В ГТД ЗАБАЛЛАСТИРОВАННЫХ МЕТАНОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Христич В.А., Хижazi А.О., Ольховская Н.Н., Левчук С.А.

Национальный технический университет Украины "КПИ", г. Киев.

Наиболее радикальным методом повышения экономической эффективности и экологической чистоты современной энергетики является внедрение в нее газотурбинных и парогазовых технологий. Однако во многих регионах возможности их внедрения ограничиваются дефицитом природного газа, который является основным топливом современных энергетических и промышленных ГТД.

Приоритетность природного газа, как топлива, обусловлена преобладанием в нем метана (CH_4), который отличается, как известно, стабильностью свойств, высокой теплотой сгорания, отсутствием золы и других экологически вредных включений. Попытки же заменить его продуктами интегрированной с ГТД газификации угля или биомасс сопровождается снижением КПД и значительным удорожанием их стоимости.

Между тем, в природе (в ее земных и водных недрах), наряду с "чисто" метановыми месторождениями, содержатся огромные запасы горючих газов, в которых метан находится в состоянии, разбавленном теми или иными балластными примесями (воздух, N_2 , CO_2). По содержащимся в них энергоресурсам, эти газы значительно превосходят разведанные запасы природного газа и, в принципе, могли бы стать ему альтернативой.

Однако практическая реализация этих потенциальных возможностей в настоящее время резко ограничена негативным влиянием балластных примесей на физико-химические и теплотехнические характеристики горючего газа: на его теплоту сгорания и стехиометрический коэффициент (табл.1) [1], на концентрационные границы воспламенения и скорость распространения пламени [2], на устойчивость процесса горения (даже при диффузионном его механизме – Рис.1 а).

Причем, специфические трудности вызывает не только само наличие этих примесей, но также разный их состав, различная, а во многих случаях и переменная во времени их концентрация. Особенно большие трудности это порождает в камерах сгорания ГТД, где регулирование мощности связано с

изменением режимных условий процесса горения: температуры, коэффициента избытка воздуха и т.д.

Таблица 1 Влияние балластных примесей к метану на теплоту сгорания и стехиометрический коэффициент горючего газа

$\bar{G}_{бал}$	$(Q_H^P)'$ кДж/кг	$(L_0)'$, кг/кг	
		CH ₄ + воздух	CH ₄ + CO ₂
0	49800	16,8	16,8
0,25	39840	13,2	13,4
1,0	24900	7,9	8,4
1,5	19920	6,1	6,7

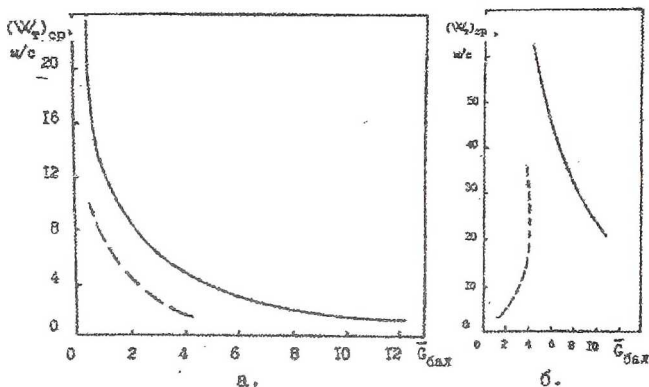


Рис.1. Влияние балластных примесей на устойчивость горения метано-содержащего диффузионного факела:

(а) - свободного, (б) - в струйно-стабилизаторном модуле;
 ————— ($CH_4 + \text{Воздух}$); - - - - - ($CH_4 + CO_2$)

Понятно, что регулирование расхода топлива, одновременно учитывающее как изменение нагрузки ГТД, так и плавающий состав горючего газа, требует очень сложной регулирующей системы. Стандартный же способ стабилизации горения низкокалорийных газов с помощью размещения в камере сгорания автономного высокотемпературного дежурного факела – требует наличия высококалорийного топлива, дефицит которого и породил рассматриваемую проблему.

Одним из наиболее простых решений может быть, как показали настоящие исследования, использование в газотурбинной камере сгорания струйно-стабилизаторной системы смесеобразования и стабилизации горения

[3], которая обладает свойством саморегулируемости, поддерживающей в факеле маломеняющийся состав смеси при изменении в камере общего коэффициента избытка воздуха [4].

Принципиальная схема струйно-стабилизаторного фронтального устройства изображена на рис.2 (а). Как видно, оно представляет собой совокупность так называемых струйно-стабилизаторных модулей, каждый из

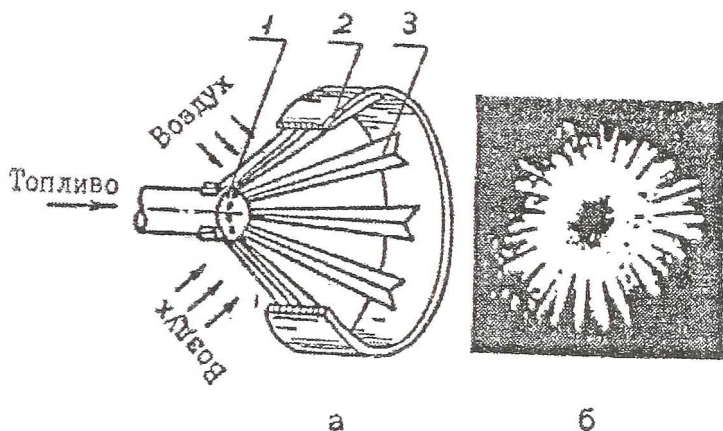


Рис.2. Схема струйно-стабилизаторного фронтального устройства (а) и вид его факела (б) :

- 1 – топливная многоструйная форсунка; 2 – обечайка;
3 – уголковые стабилизаторы

которых имеет вид обтекаемого воздухом уголкового стабилизатора с развивающейся вдоль его створа топливной струей (рис.3 а). Сюда рециркуляционным течением стабилизатора подается и нужный для смешения воздух, и необходимые для стабилизации модульного факела продукты сгорания. В результате, каждый модуль образует развивающийся вдоль своего стабилизатора элементарный факел, а их совокупность – своеобразную микрофакельную систему. (Рис.2 б)

При всех прочих равных условиях, средний коэффициент избытка воздуха в модульном факеле

$$\alpha_{\phi} \sim \bar{B}_{\sigma} = \frac{B_{\sigma}}{d_c},$$

где B_{σ} – миделевая ширина стабилизатора, а d_c – диаметр топливного сопла.

Для реализации механизма саморегулируемости постоянства α_{ϕ} необходима изображенная на рис.3 (б) пропорциональность длины факела вдоль

стабилизатора (l_ϕ) расходу или массовой скорости истекающей из модульного сопла топливной струи ($\rho_T W_T$). Настоящие исследования показали, что в предпочтительной для газотурбинных камер сгорания области значений $B_{ст}$, d_c ($B_{ст}$ близко к 30мм, $d_c = 3-5$ мм) такой характер зависимости $l_\phi = f(\rho_T W_T)$

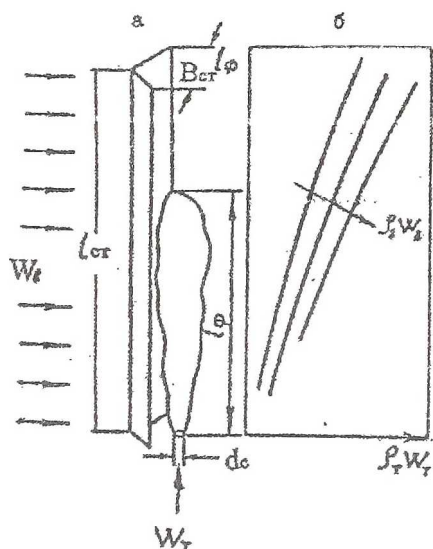


Рис.3. Схема процесса саморегулируемости струйно-стабилизаторного модуля

щего стабилизатор воздушного потока ($\rho_B W_B$). При работе модуля на чистом метане (природный газ) совместное влияние рассмотренных выше факторов обобщается зависимостью:

$$l_\phi \sim d_c \frac{\rho_T W_T}{\rho_B W_B} B_{ст}^{0,75} \quad (1)$$

Благодаря ей, изменение (по любой из отмеченных выше причин) относительной длины факела вдоль стабилизатора

$$\bar{l}_\phi = \frac{l_\phi}{l_{ст}}$$

сопровождается соответствующим (пропорциональным) изменением количества принимающего в смесеобразовании воздуха, т.к. воздух, остающийся за пределами длины факела, практически не принимает участия в этом процес-

возможен только при ламинарном ядре факела. Именно такой характер его ядра и обеспечивает необходимую пропорциональность $l_\phi = f(\rho_T W_T)$, в то время как внешняя оболочка рассеивающегося топливного факела под воздействием поля турбулентности зоны рециркуляции обеспечивает интенсивное смесеобразование и выгорание образующейся за стабилизатором горючей смеси.

Из рис.3 (б) очевидна также обратно пропорциональная зависимость l_ϕ от массовой скорости обтекающей

се. Т.е., если коэффициент избытка воздуха в застабилизаторном пространстве

$$\alpha_{ст} \sim \left(\frac{B_{ст} \rho_B W_B}{L_o \rho_T W_T} \right) \cdot \bar{\ell}_{ст}, \quad (2)$$

то в застабилизаторном (модульном) факеле величина его

$$\alpha_{\phi} \sim \left(\frac{B_{ст} \rho_B W_B}{L_o \rho_T W_T} \right) \cdot \bar{\ell}_{\phi}, \quad (3)$$

откуда

$$\alpha_{\phi} \sim \alpha_{ст} \cdot \bar{\ell}_{\phi} \approx \text{const}$$

Поскольку физически длина горящего факела зависит (при всех прочих равных условиях) не столько от расхода топливного газа, сколько от расхода потребляемого на горение воздуха ($\sim L_o$) или выделяющегося при этом количества тепла (Q_{ϕ}), логичным было ожидать, что описанный выше механизм саморегулируемости струйно-стабилизаторного модуля должен быть способным реагировать необходимым образом и на разбавление топливного газа балластными примесями.

Неясным, однако, оставался вопрос в отношении влияния последних на режим горения модульного факела. Связано это с тем, что режим течения горящего факела (в данном случае, его ядра) не связан, как известно [5], с режимом истекающей из сопла топливной струи¹ и поэтому горящий факел может переходить из ламинарного в турбулентный режим при числах Re , не имеющих никакого отношения к газодинамическому (трубному) $Re_{кр}$. В связи с изложенным, выяснение этого вопроса (в условиях свободного диффузионного факела) составило одну из первых задач настоящего исследования.

Для случаев разбавления метана воздухом (газ типа шахтного метана) и CO_2 его результаты приведены в табл.2.

Кроме вида примесей, здесь в широких пределах варьируется также их содержание ($\bar{G}_{бал} = G_{бал} / G_{CH_4}$) и диаметр топливного сопла (3, 4, 5 мм). Результатом являются подсчитанные по параметрам истекающей (холодной) струи $Re_{кр}$, соответствующие переходу горящего факела из ламинарного в турбулентный режим, и, соответственно, предельные длины ламинарного факела.

¹ Даже будучи на выходе из сопла турбулентной, она далее ламинаризуется вследствие повышения вязкости газа из-за тепловыделения в факеле.

Как видно, в пределах опробованных значений d_c , $Re_{кр}$ факелов забалластрированных газов составляет от ~1200 до 2800, увеличиваясь при увеличении $\bar{G}_{бал}$ (см. таблицу 2). Что касается предельной длины ламинарного факела $(l_{\phi}^n)_{кр}$, то она несколько уменьшалась при увеличении $\bar{G}_{бал}$, но даже в

Таблица 2. Влияние балластных примесей на критический режим свободного диффузионного факела.

Вид топливного газа	$\bar{G}_{бал}$	Характеристика критического режима	$d_c, мм$		
			3	4	5
CH ₄	0	$Re_{кр}$	~1400	~1500	~1300
		$(l_{\phi}^n)_{кр} / d_c$	166	150	130
CH ₄ +CO ₂	1,2	$Re_{кр}$	~1250	~2100	~2300
		$(l_{\phi}^n)_{кр} / d_c$	133	140	126
CH ₄ +CO ₂	1,8	$Re_{кр}$	~1300	~1900	~2800
		$(l_{\phi}^n)_{кр} / d_c$	126	125	104
CH ₄ + воздух	1,2	$Re_{кр}$	~1400	~1200	~2200
		$(l_{\phi}^n)_{кр} / d_c$	120	120	120
CH ₄ + воздух	1,8	$Re_{кр}$	~1600	~2150	~2200
		$(l_{\phi}^n)_{кр} / d_c$	116	220	104

минимальном своем значении составляла $>350-400$ мм, т.е. являлась достаточной для широкого диапазона типоразмеров газотурбинных струйно-стабилизаторных фронтных устройств, где расчетному (номинальному) режиму должно отвечать условие $l_{\phi} \approx l_{кр}$.

Исследование рабочего процесса струйно-стабилизаторного модуля на забалластрированных газах (CH₄+ воздух; CH₄+ CO₂) проводилось на стабилизаторе с размерами: $V_{ст}=30$ мм; $l_{ст}=300$ мм при $d_c=3, 4, 5$ мм на двух скоростях обтекающего стабилизатор воздушного потока: 20 и 30 м/с. (при нормальных параметрах воздуха)

Для одного из газов типичные результаты представлены на рис.4 в виде зависимостей $l_{\phi} = f(G_T; \bar{G}_{бал})$ при фиксированном значении W_b . Как видно, при неизменном расходе топлива (G_T) ввод и увеличение концентрации балластной примеси сокращают длину факела вдоль стабилизатора, но не нару-

шают необходимую для саморегулируемости модуля пропорциональность $l_{\phi} = f(G_T)$. То же наблюдалось и при всех других исследованных режимных условиях.

Таким образом, струйно-стабилизаторные модули, действительно, способны автоматически поддерживать маломеняющиеся α_{ϕ} и, соответственно, температуру в факеле при любой концентрации в топливе балластной примеси. Благодаря этому, на систему регулирования ГТД, несмотря на плавающий состав топливного газа, могут возлагаться лишь стандартные функции – регулирование его расхода в камеру сгорания в функции нагрузки.

Нужно заметить, что при сжигании забалластированных газов применение саморегулирующихся струйно-стабилизаторных модулей в равной мере может быть приложимо к решению двух задач:

- и к созданию всережимного фронтного устройства;
- и к созданию высокостабильной дежурной горелки, не нуждающейся в специальном высококалорийном топливе.

В обоих случаях при выполнении расчетов и проектирования могут быть полезны полученные в работе экспериментальные графики типа рис.4 или обобщающие их зависимости. Одна из таких зависимостей построена на основе полученного при анализе графиков вывода о том, что определяющую роль в длине модульного факела за стабилизатором играет не сама балластная примесь и ее содержание, а “остаток” незамещенного ею главного горючего компонента- ($G_{CH_4} = G_T - G_{бал}$). Поэтому все результаты хорошо обобщаются одной зависимостью:

$$l_{\phi} = 4 \cdot 10^4 \frac{G_{CH_4}}{W_b} \frac{(1 + \bar{G}_{бал})}{\sqrt{(1 + \bar{G}_{бал})}}, \text{ мм.} \quad (4)$$

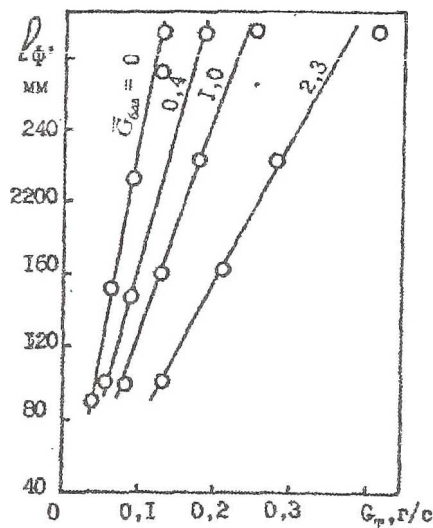


Рис.4. Влияние балластной примесей (CO_2) на длину факела в струйно-стабилизаторном модуле ($d_c = 4$ мм; $W_b = 20$ м/с)

Еще более универсальной может быть зависимость, в которой содержание горючего компонента замещено соответствующим тепловыделением факела ($Q_\phi = G_{CH_4} \cdot Q_n^p$ или $G_T \cdot (Q_n^p)'$):

$$\ell_\phi = 1150 Q_\phi \frac{\sqrt[4]{(1 + \bar{G}_{бал})}}{W_n \rho_n}, \text{ мм.} \quad (5)$$

Об эффективности стабилизирующих свойств струйно-стабилизаторного модуля красноречиво говорит рис.1 (б), где срывные значения W_T и $\bar{G}_{бал}$ даже при наличии сносящего воздушного потока намного превосходят приведенные на рис.1 (а) аналогичные характеристики свободного забалластированного диффузионного факела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Ефективне та екологічно чисте спалення в теплоенергетичних установках забаластованих газів перемінного складу. / Христинч В.О., Хайжасі А., Макара Р.М., Шелковський Б.І. // Матеріали 5^{ої} міжнародної конференції "Нафта – Газ України – 98". Збірник наукових праць, Полтава. -1998. -т.2. -С.332-333.
3. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. -М.: Изд. МГУ, 1957. -442с.
4. Христинч В.А., Любчик Г.Н. Струйно-стабилизаторные газогорелочные устройства и их применение в энергетике и промышленности. // Доклад на XI международном газовом конгрессе. -М. -1970. -19с.
5. Христинч В.А. Струйно-стабилизаторный способ смесеобразования и горения как один из методов повышения экономичности и снижения токсичности газотурбинных двигателей. // Проблемы машиностроения. -1983. - Вып.20. -С.63-66.
6. Льюис Б., Элбе С. Горение, пламя и взрывы в газах. -М.: Мир, 1968. -592с.

УДК 621.43.056

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ В СОСТАВЕ ГТД И ГТУ

Лукачев С.В., Цыганов А.М., Ковылов Ю.Л.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Камеры сгорания газотурбинных двигателей и установок отличаются большим разнообразием схемного и конструктивного исполнения по сравнению с другими узлами двигателя, например компрессором или турбиной. С одной стороны, это связано со сложностью физико-химических и термогазо-