

УДК 621.438

В.Н. Литошенко, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: emss@stel.sebastopol.ua***МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА В ЗОНЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ЗА СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЛАМЕНИ**

Характеристики камер сгорания ГТУ зависят от режима горения топлива при турбулентном течении интенсивность процессов смешения топлива и горения в несколько раз выше, чем при ламинарном течении. Предлагается метод определения критического числа Рейнольдса по изменению режима горения на переходных участках характеристик срыва и зажигания пламени за уголковыми стабилизаторами при горении газообразного топлива, подаваемого в зону противотока. Предложен коррелирующий параметр для определения $Re_{кр}$ для камер сгорания промежуточного подогрева газа, который позволит рассчитать их характеристик.

Тела плохообтекаемой формы довольно часто находят применение в качестве стабилизаторов пламени в высокофорсированных камерах сгорания (форсажные камеры, камеры сгорания прямоточных ВРД, струйно-стабилизаторные горелки, встроенные кольцевые прямоточные камеры сгорания промежуточного подогрева газа ГТУ [1] и т.д.).

Условия развития процесса горения и стабилизации пламени, как при горении гомогенных топливно-воздушных смесей, так и при диффузионном сжигании топлива за стабилизатором, во многом зависят от гидродинамических факторов, определяющих режим обтекания стабилизатора и процессов массо- и теплообмена в зоне циркуляции за ним.

Большинство опубликованных до настоящего времени работ по определению режима течения за плохообтекаемыми телами относятся к случаю изотермического течения и горения гомогенных и двухфазных топливно-воздушных смесей. При изотермическом течении ряд авторов пришли к общим количественным зависимостям, согласно которым при числе $Re > 10^4$ переход к турбулентному режиму начинается в точке отрыва пограничного слоя от плохообтекаемого тела (цилиндра для приведенных данных), а при числе $Re > 2 \cdot 10^5$ переход ламинарного течения в турбулентное будет предшествовать отрыву пограничного слоя. Число $Re_{кр}$ зависит также от формы тела (например, для шара $Re_{кр} = 3 \cdot 10^4$, а для цилиндра $Re_{кр} = 1,5 \cdot 10^4$ [2]).

При горении гомогенных смесей, по утверждению Вильямса, Ву и Шипмена [3], нет никакого смысла пользоваться числами $Re_{кр}$ при обработке экспериментальных данных, так как в ходе опытов весьма существенно меняется вязкость и поэтому число Re не является коррелирующим параметром. Вильямс и Шипмен [4] нашли, что число Re не характеризует структуру пламени (при $Re_{кр} = \text{const}$ распределение давления на поверхности стабилизатора является функцией абсолютного размера). По данным авторов [3] Жуковский, используя водоохлаждаемые стабилизаторы, также установил, что число $Re_{кр}$ растет с ростом ширины стабилизатора ($Re_{кр} = 1 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^4$ в зависимости от ширины и формы по ширен-фотографии и $Re_{кр} = 4 \cdot 10^3$ – по атомарному составу газа в зоне циркуляции).

Авторы [3] предполагают, что температура слоя, отделяющегося от стабилизатора, определяет вязкость, следовательно, и $Re_{кр}$ ($Re_{кр} \sim T^{1,7}$), так как с ростом ширины стабилизатора растет и подогрев пограничного слоя на нем ($Re_{кр} = 5 \cdot 10^4 \dots 7 \cdot 10^4$ – по атомарному составу газа).

Таким образом, нет единого мнения о величине числа $Re_{кр}$, соответствующего переходному режиму, и неудовлетворительно объяснено влияние ширины стабилизатора на $Re_{кр}$.

Интенсивность смешения топлива, подаваемого в зону циркуляции, зависит от гидродинамических условий. Таким образом, режим течения в зоне циркуляции определяет режим горения и можно, используя характеристики срыва и зажигания пламени, а также характеристики горения, определить режим течения (число $Re_{кр}$ соответствует в данном случае переходному режиму горения).

Цель статьи – оценка числа Рейнольдса $Re_{кр}$ для определения режима горения.

Из показанных на рисунке 1 характеристик срыва и зажигания пламени видно, что в районе скоростей потока на срезе стабилизатора $W_1 = 50 \dots 100$ м/с ($t_1 = 600^\circ\text{C}$, атмосферное давление, форкамерный подогрев) при подаче топлива в зону противотока для стабилизаторов всех испытанных ширин на кривых появляются местные сужения диапазонов устойчивых зажигания и стабилизации пламени. При скоростях потока меньших указанного уровня $W_{1(кр(заж))}$ не зависит от коэффициента избытка воздуха, что характерно для диффузионного режима горения. Следовательно, интенсивность процессов смешения в зоне противотока недостаточна для полного выравнивания концентрации топлива в зоне.

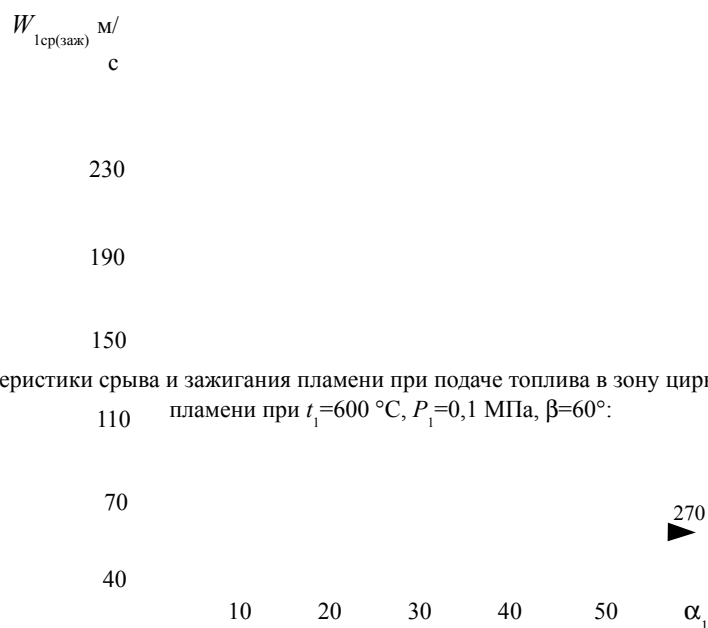


Рисунок 1 – Характеристики срыва и зажигания пламени при подаче топлива в зону циркуляции за стабилизатором пламени при $t_1=600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_1=0,1\text{ МПа}$, $\beta=60^{\circ}$:

		$\alpha_{1\text{срыва}}$	$\alpha_{1\text{зажигания}}$
подача топлива в зону противотока:	B=15 мм	1 ▽	2 ▼
	B=30 мм	3 □	4 ■
	B=60 мм	5 ○	6 ●
подача топлива в пограничный слой:	B=60 мм	7 △	8 ▲

При скоростях потока выше переходного участка форма характеристик схожа со срывными характеристиками при кинетическом горении гомогенных топливно-воздушных смесей. Кроме того, в этой же переходной области наблюдается резкое изменение характера зависимостей длины факела и максимальной температуры от W_1 и др. в сторону уменьшения влияния скорости потока. Следовательно, процессу горения топлива в зоне противотока характерны кинетические признаки, что соответствует полному перемешиванию топлива в зоне.

Такое резкое изменение интенсивности процессов смешения можно объяснить полной турбулизацией зоны циркуляции, характеризующейся числом больше $Re_{кр}$.

При подаче топлива в пограничный слой у кромок стабилизатора “бедная” ветвь срывной характеристики не претерпевает резких изломов во всем диапазоне скоростей (рисунок 1), что косвенно указывает на неизменность режима течения в этой области следа. “Богатые” ветви характеристик срыва зажигания пламени для всех вариантов (по ширине и способу топливоподачи) совпадают и не имеют переходных участков, так как срыв пламени для всех вариантов происходит во внешних линиях тока циркуляционной зоны, где интенсивность процессов смешения примерно одинакова. Бедная ветвь характеристики зажигания при подаче топлива в пограничный слой имеет переходной участок, так как зажигание пламени зависит от концентрации топлива в зоне противотока, определяемой интенсивностью смешения.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что турбулизация зоны циркуляции происходит постепенно с ростом скорости потока от пограничного слоя у кромок стабилизатора к центру зоны. Поэтому с ростом ширины стабилизатора растет число $Re_{кр}$, так как при этом увеличивается абсолютное расстояние между пограничными слоями, сходящими с кромок стабилизатора и чтобы полностью стабилизировать зону противотока требуется более высокий уровень скоростей потока (рисунок 1, таблица 1).

Уменьшение диапазонов устойчивых стабилизации и зажигания пламени на переходном участке можно объяснить тем, что с ростом скорости потока диффузионный факел все больше размывается обратными токами, поэтому растет необходимое количество топлива для устойчивой его стабилизации у торца стабилизатора. В момент полной турбулизации зоны противотока режим горения становится кинетическим и происходит увеличение диапазонов устойчивых стабилизации и зажигания пламени за счет полного смешения топлива во всей зоне противотока или ее части, где стабилизируется факел пламени.

Таблица 1 – Влияние ширины стабилизатора на число $Re_{кр}$ (угол раскрытия стабилизаторов $\beta=60^\circ$)

	B [мм]		
	60	30	15
$W_{1cp(зак)} [м/с]$	100	75	50
$Re_{кр}$	$6,1 \cdot 10^4$	$2,28 \cdot 10^4$	$0,76 \cdot 10^4$
$\frac{W_{1cp(зак)}}{B^{0,45}} \left[\frac{м}{с \cdot (0,001м)^{0,45}} \right]$	15,65	16,2	14,8

В опубликованных работах имеются подобные переходные участки, хотя авторы считали их случайными и не учитывали. Примером могут служить срывные характеристики при горении гомогенных топливо-воздушных смесей, приведенные Солохиным [5], когда для серии стабилизаторов пламени, аналогичных по геометрическим характеристикам стабилизаторам, испытанным в настоящей работе ($B=10...60$ мм, $\beta=60^\circ$), в диапазоне скоростей потока $W_1=50...100$ м/с четко видны переходные участки, на много сужающие диапазоны устойчивой работы. Однако числа $Re_{кр}$, соответствующие этим участкам, в 2...3 раза больше, чем при диффузионном сжигании топлива (для $B=30$ мм $W_1=100$ м/с $Re_{кр}=6,1 \cdot 10^4$; для $B=20$ мм $W_1=75$ м/с $Re_{кр}=3,1 \cdot 10^4$). Появление переходных участков в этом случае можно объяснить увеличением съема теплоты с обратных токов при полной турбулизации зоны противотока стабилизатором с дальнейшей передачей его основному потоку. При этом температура газа в зоне противотока у стабилизатора должна несколько уменьшаться и поэтому при смешении со свежей смесью (топливно-воздушной) ее воспламенение несколько запаздывает за счет чего и происходит сужение диапазона устойчивой работы. Переходной участок в этом случае начинается после полной турбулизации зоны противотока, поэтому числа Re , соответствующие этому участку выше, чем в предыдущем случае.

Предположение авторов [2] о влиянии на $Re_{кр}$ подогрева пограничного слоя на поверхности стабилизатора по нашим данным несостоятельно, так как режимные условия проведенных испытаний ($t_1=500...700^\circ C$, атмосферное давление $P_1=0,1$ МПа) и охлаждение стабилизаторов топливом делали подогрев пограничного слоя не определяющим и все влияние ширины стабилизатора на $Re_{кр}$ можно отнести за счет постепенной турбулизации зоны противотока при различном расстоянии между кромками стабилизатора.

Для определения $Re_{кр}$, соответствующего местному сужению диапазона устойчивой работы, при расчете камер сгорания со стабилизаторами данной формы ($\beta=60^\circ$) найден коррелирующий параметр:

$$\frac{W_{1cp(зак)}}{B^{0,45}} = f(\alpha_1),$$

хорошо обобщающий экспериментальные данные для испытанных типоразмеров стабилизаторов (рисунок 2, таблица 1).

28

20

Рисунок 2 – Приведенные характеристики срыва и зажигания пламени при подаче топлива в зону противотока $t_1=600^\circ C$, $P_1=0,1$ МПа, $\beta=60^\circ$ (обозначения

12

$$\left(\frac{W_{1cp(зак)}}{B^{0,45}} \right)_{кр} \approx 16$$

4

► ►
55 270

10 20 30 40 α_1

В заключение необходимо отметить, что по абсолютной величине числа $Re_{кр}$ совпадают со значениями, полученными другими авторами, методами шлирен-фотографии и по атомарному составу газа в зоне противотока, что указывает на верность предложенной методики и качественное совпадение чисел $Re_{кр}$, характеризующих изменение режима течения при горении гомогенных топливно-воздушных смесей и диффузионном сжигании топлива при подаче его в зону циркуляции, т.е. зажигаться одновременно с основными камерами сгорания при пуске ГТУ при малых скоростях воздуха и устойчиво работать на всех режимах до расчетного подогрева.

Эти вопросы актуальны в связи с развитием исследований по когенерационным ГТУ [1] при автономной работе камер сгорания промежуточного подогрева газа. Перспектива дальнейших исследований состоит в создании работоспособных конструкций встроенных кольцевых камер сгорания промежуточного подогрева газа, надежно работающих как на номинальных, так и минимальных подогревах с переходом от кинетического к диффузионному режиму горения при $Re < Re_{кр}$.

Библиографический список

1. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики ГТД с промежуточным подогревом газа и силовой турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев, В.Н. Литошенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*: Зб. наук. пр. — Харків, 2004. — Вып. 8/16. — С. 69–72.
2. Гольдштейн С. Современное состояние гидродинамики вязкой жидкости / С. Гольдштейн. — М.: ИИЛ, 1948. — 623 с.
3. Вильямс Ж.Ж. Влияние пограничного слоя на характеристики устойчивости плохообтекаемых стабилизаторов / Ж.Ж. Вильямс, Р.Т. Ву, С.В. Шипмен // *Вопросы зажигания и стабилизации пламени*: Сб. статей. — М.: ИИЛ, 1963. — С. 194–218.
4. Вильямс Ж.Ж. Изменения атомарного состава газа в следе стабилизатора пламени / Ж.Ж. Вильямс, С.В. Шипмен // *Тр. IV Междунар. симп. по вопросам горения и детонационных волн*. — Балтимора, 1953. — М.: Оборонгиз, 1958. — 508 с.
5. Солохин Э.Л. Исследование распространения и стабилизации пламени за корытообразными стабилизаторами / Э.Л. Солохин // *Стабилизация пламени и развитие процесса сгорания в турбулентном потоке*. — М.: Оборонгиз, 1961. — С. 48–74.

Поступила в редакцию 12.07.2006 г.