

УДК 621.452.3.036

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup1.09

Д. В. КОЗЕЛ

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорозьє, Україна

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПЛАМЕНИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО ТИПА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Камерами сгорания прямооточного типа являются форсажные камеры сгорания, которые применяются для кратковременного увеличения тяги газотурбинного двигателя на взлете, совершения маневров и преодоления самолетом звукового барьера и его полета со сверхзвуковой скоростью. Также, прямооточные камеры сгорания применяются в составе прямооточных воздушно-реактивных двигателей в качестве основных камер сгорания, в которых обеспечивается процесс сжигания топлива и подвод тепла к рабочему телу. В результате решения задачи теоретического исследования потерь полного давления при местном гидравлическом сопротивлении фронтального устройства прямооточной камеры сгорания в виде решетки V-образных стабилизаторов сформирована математическая модель расчета значения коэффициента местного гидравлического сопротивления. Получено, что коэффициент местного гидравлического сопротивления решетки V-образных стабилизаторов зависит от степени затенения потока стабилизаторами и угла при вершине V-образных стабилизаторов пламени. Проведен анализ влияния размеров и формы стабилизаторов пламени фронтального устройства на гидравлические характеристики. В результате анализа установлено, что коэффициент местного гидравлического сопротивления зависит от угла при вершине V-образного стабилизатора практически линейно, а темп нарастания коэффициента местного гидравлического сопротивления по мере увеличения степени затенения увеличивается. Рассчитанные по разработанной математической модели коэффициенты местного гидравлического сопротивления удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными. Использование разработанной математической модели расчета коэффициента местного гидравлического сопротивления возможно в рамках метода выбора геометрических размеров фронтального устройства и длины камеры сгорания на начальных этапах проектирования.

**Ключевые слова:** прямооточная камера сгорания; стабилизаторы пламени; фронтальное устройство; потери полного давления.

### Введение

Направление по созданию двигателей для сверхзвуковых летательных аппаратов различного назначения с каждым годом становится все более перспективным для авиационной промышленности и всей авиационной отрасли Украины. Как известно, для данного класса двигателей широко применяются газотурбинные двигатели с форсажной камерой сгорания, а также прямооточные воздушно-реактивные двигатели. В составе прямооточных воздушно-реактивных двигателей прямооточные камеры сгорания применяются в качестве основных камер сгорания, в которых обеспечивается подвод тепла к рабочему телу за счет сжигания в нем топлива. Также форсажные камеры сгорания газотурбинных двигателей являются камерами прямооточного типа и применяются для кратковременного увеличения тяги на взлете, преодоления летательным аппаратом звукового барьера и его полета со сверхзвуковой скоростью, совершения маневров.

В современных условиях высокой конкуренции на мировом рынке без обеспечения высокой эффек-

тивности разрабатываемого двигателя при минимальных затратах времени и материальных ресурсов не возможна успешная реализация проекта создания ПВРД или ТРДФ (ТРДДФ). Поэтому важными задачами являются обеспечение эффективности рабочего процесса в узлах двигателя, снижение массы и габаритных размеров, снижение стоимости разработки и изготовления, а также сокращения сроков реализации проекта разработки и доводки узлов двигателя, в том числе и камеры сгорания. Решение этой задачи возможно благодаря разработке эффективных методов проектирования, использующих методики расчета рабочих характеристик, которые бы обеспечивали высокую точность и способность учитывать влияние как можно большего количества факторов. Особую важность это представляет на начальных этапах проектирования, когда закладывается основа для выбора конструктивной схемы проекта.

Как известно, для организации процесса горения топлива в прямооточной камере сгорания наиболее рациональным является организация турбулентного горения топлива в следе за плохообтекаемым телом, для чего в качестве фронтального устройства камеры

применяют систему стабилизаторов пламени радиального, кольцевого или радиально-кольцевого типа. Основными геометрическими параметрами такого фронтального устройства являются ширина стабилизатора пламени  $h$ , межосевое расстояние между стабилизаторами  $H$ , площадь проходного сечения и степень затенения потока  $\bar{f}_{ст}$  - отношения площади поперечного сечения стабилизаторов к суммарной площади поперечного сечения камеры сгорания. Основные геометрические параметры фронтального устройства показаны на рисунке 1.

Основными требованиями к эффективности и функциональности рабочего процесса, массе и габаритным размерам камер сгорания являются:

- высокий уровень полноты сгорания топлива в камере;
- минимальный уровень гидравлических потерь как на форсированных, так и на нефорсированных режимах работы двигателя;

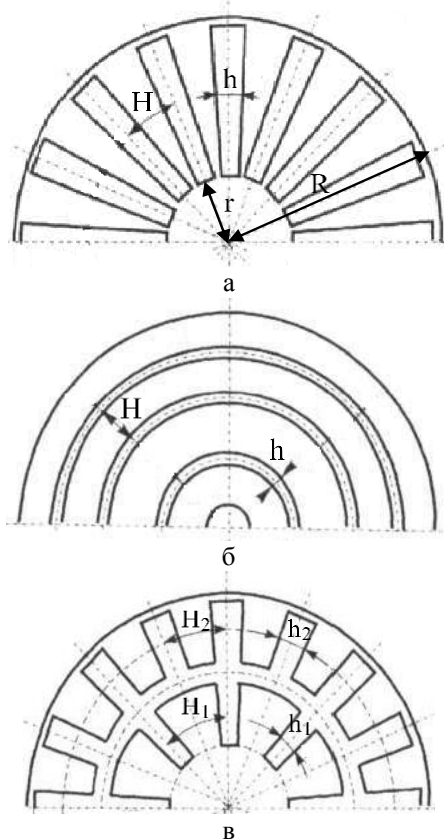


Рис. 1. Геометрические параметры фронтального устройства:  
 а - фронтальное устройство с радиальными стабилизаторами;  
 б - фронтальное устройство с кольцевыми стабилизаторами;  
 в - фронтальное устройство с радиально-кольцевыми стабилизаторами

- надежный розжиг камеры сгорания во всех условиях эксплуатации двигателя при минимальном времени розжига;

- обеспечение устойчивой работы в заданных пределах высотно-скоростного диапазона применения двигателя для всех условий форсирования тяги;

- отсутствие вибрационного горения во всём диапазоне эксплуатационных режимов, появление которого ведет к разрушению элементов двигателя;

- обеспечение минимально возможной массы прямоточной камеры сгорания при условии обеспечения достаточной прочности конструкции и ее назначенного ресурса;

- обеспечение минимально возможной длины и диаметра камеры сгорания.

Задача обеспечения всего комплекса перечисленных требований усугубляется тем фактом, что практическая реализация обеспечения одних требований ведет к невозможности обеспечения других требований. Одним из ключевых элементов прямоточной камеры сгорания, от которого зависит обеспечение указанных выше требований является фронтальное устройство камеры сгорания, представляющее собой систему стабилизаторов пламени. Именно поэтому вопросу исследования характеристик стабилизаторов пламени уделяется большое внимание, результаты таких исследований приведены в публикациях [1-5].

В работах [6-9] приведены методы и подходы для решения задачи обеспечения всего комплекса требований к характеристикам при проектировании прямоточных камер сгорания. Использование этих методов и подходов требует в том числе и исследования вопроса влияния размеров и формы стабилизаторов пламени фронтального устройства на гидравлические характеристики. Так, результаты экспериментальных и расчетных данных для коэффициента гидравлического сопротивления стабилизаторов пламени приведены в работах [10-13]. Однако представленные в этих работах результаты разнятся и имеют ограниченный или не полный объем данных по влиянию угла при вершине V-образного стабилизатора и степени затенения потока решеткой стабилизаторов на гидравлическое сопротивление. Поэтому существует необходимость в проведении научных работ, дополняющих существующие теоретические и экспериментальные исследования о влиянии размеров и формы стабилизаторов пламени фронтального устройства на гидравлические характеристики, результаты которых требуются для решения задачи выбора геометрических размеров фронтального устройства и длины камеры сгорания авиационного двигателя на начальных этапах проектирования.

Таким образом, задача исследования влияния размеров и формы стабилизаторов пламени фронтального

вого устройства на гидравлические характеристики является важной и актуальной.

### Постановка задачи

Целью данной работы является исследование влияния размеров и формы стабилизаторов пламени фронтального устройства на гидравлические характеристики и местное гидравлическое сопротивление стабилизаторов для использования результатов исследования при решении задачи выбора геометрических размеров фронтального устройства и длины камеры сгорания авиационного двигателя на начальных этапах проектирования. Проведение такого исследования возможно с использованием методов вычислительной аэрогидродинамики [14-16]. Однако применение данного метода на начальных этапах проектирования является весьма затратным в части времени на подготовку и проведение расчетов. Поэтому в данной работе использован теоретический метод исследования, для реализации которого требуется решение задачи формирования аналитической математической модели, описывающей влияние размеров и формы стабилизаторов пламени фронтального устройства на гидравлические характеристики. Используя разработанную математическую модель необходимо выполнить анализ степени и характера влияния геометрических характеристик стабилизатора на величину коэффициента гидравлического сопротивления. Также необходимо выполнить сравнение рассчитанных по разработанной математической модели данных с результатами экспериментов.

### Решение задачи

Рассмотрим вопросы гидравлического сопротивления вследствие вихреобразования при внезапном расширении и гидравлическом ударе потока, обтекающего стабилизаторы пламени. Поскольку наиболее часто при проектировании фронтальных устройств прямоточных камер сгорания используется конфигурация стабилизатора пламени в форме V-образного тела в продольном сечении потока, далее будем рассматривать задачу обтекания именно решетки V-образных стабилизаторов.

Схема обтекания V-образного стабилизатора пламени потоком газа показана на рисунке 2. Геометрическими характеристиками и параметрами решетки стабилизаторов являются: угол при вершине V-образного стабилизатора  $\Theta = 2\varphi$ , ширина стабилизатора  $h$ , шаг между стабилизаторами  $H$ , степень затенения потока стабилизаторами  $\bar{f}_{ст} = \frac{h}{H}$ . Далее будем рассматривать случай двухмерного каскада (решетки)

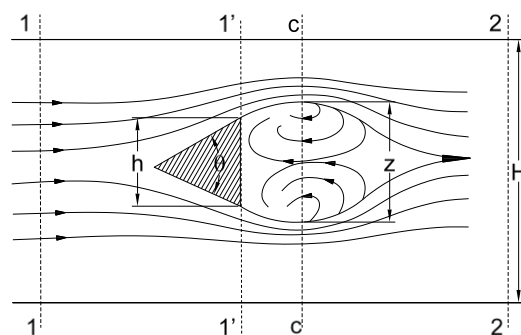


Рис. 2. Схема обтекания стабилизатора пламени

неограниченного количества V-образных стабилизаторов с неограниченной высотой, расположенных с равномерным шагом  $H$  (в направлении перпендикулярном потоку) и постоянной шириной  $h$ . Будем рассматривать случай с решеткой не эшелонированных стабилизаторов, когда выходная кромка всех стабилизаторов в решетке расположена в одной плоскости сечения  $1'-1'$ . Скорость потока газа в сечении  $1-1$  на удалении от решетки стабилизаторов направлена перпендикулярно ширине стабилизаторов, поле скорости однородное со значением  $w_1$ . Поэтому течение будем считать двухмерным. Обтекая V-образный стабилизатор, поток отрывается от задней кромки стабилизатора, формируя “свободную струю” и “мертвую” зону обратных токов. В сечении максимального сужения “свободной струи”  $c-c$  ширина зоны обратных токов равна  $Z$ , расход газа на участке  $Z$  сечения  $c-c$  равен нулю. Поток в сечении  $c-c$  на участке шириной  $H-Z$  будем считать равномерным и имеющим постоянную по ширине канала скорость  $w_c$ , нормальную к сечению  $c-c$ . Статическое давление в сечении  $c-c$  будем считать равномерным и равным  $P_c$ . Поток в сечении  $2-2$ , будем считать равномерным, имеющим постоянную скорость  $w_2$ , направленную перпендикулярно ширине стабилизаторов, и постоянное по ширине канала статическое давление  $P_2$ .

Отрыв и вихреобразование потока вследствие обтекания стабилизаторов пламени приводят к перераспределению скоростей по сечению потока. Вихреобразование и перераспределение скоростей потока сопровождаются потерей механической энергии, переходящей в тепло, а, следовательно, эти явления представляют собой источник гидравлического сопротивления, который принято называть местным гидравлическим сопротивлением. Исследованию задачи местного гидравлического сопротивления плохообтекаемых тел в потоке газов посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ, но несмотря на это данный

вопрос до сих пор не решен окончательно. В работах [10-13] для определения коэффициента местных гидравлических потерь, отнесенных к скоростному напору набегающего на стабилизаторы пламени потока, используется зависимость:

$$\zeta_1 = \frac{(\sqrt{\eta \cdot \bar{f}_{\text{ст}}} + \bar{f}_{\text{ст}})^2}{(1 - \bar{f}_{\text{ст}})^2}, \quad (1)$$

где  $\eta$  - коэффициент смягчения входа струи. Зависимость (1) получена в результате решения системы уравнений неразрывности потока и сохранения импульса на участке 1-2 рисунка 1 при условии течения несжимаемого газа и зависимости для коэффициента заполнения сечения согласно [17]:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{F_c}{F_1} = \frac{H - Z}{H - h} = \frac{1}{1 + \sqrt{\eta \cdot \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)}} = \\ &= \frac{1}{1 + \sqrt{\eta \cdot \left(1 - \frac{H - h}{H}\right)}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно [17], коэффициент смягчения входа струи зависит от геометрических размеров и формы плохобтекаемого тела.

Однако методики аналитического расчета коэффициента смягчения  $\eta$  и коэффициента заполнения сечения  $\varepsilon$  в работах [10-13] не приведены. Результаты экспериментальных и расчетных данных для коэффициента смягчения входа струи различных авторов в работах [10-13] разнятся и имеют ограниченный или не полный объем данных по влиянию угла при вершине V-образного стабилизатора и степени затенения потока решеткой стабилизаторов.

Поэтому для более детального изучения вопроса влияния геометрических характеристик V-образного стабилизатора на местное гидравлическое сопротивление рассмотрим задачу обтекания решетки V-образных стабилизаторов более детально.

Из представленной на рисунке 2 схемы обтекания стабилизатора пламени при сделанных выше допущениях следует, что местные гидравлические потери полного давления реализуются на участке с-2, на котором происходит расширение потока и вихреобразование. На участке 1-с имеет место сужение потока, без расширения, отрыва, вихреобразования или удара и, следовательно, без потерь полного давления. Ввиду малости потерь полного давления, обусловленных потерями энергии потока на преодоление сил трения о стенки стабилизатора, будем считать, что потери полного давления на преодоление сил трения равны нулю. Тогда потери полного давления на участке 1-2 равны:

$$\Delta P^* = P_1^* - P_2^* = P_c^* - P_2^* = P_c - P_2 + \frac{\rho}{2} \cdot (w_c^2 - w_2^2). \quad (3)$$

Для условия течения несжимаемого газа с равномерным распределением скорости в поперечных сечениях потока с-с и 2-2 согласно закона сохранения импульса для участка с-2 имеем:

$$P_c + \rho w_c^2 \cdot \frac{\varepsilon F_1}{F_2} = P_2 + \rho w_2^2. \quad (4)$$

Из принципа неразрывности течения при указанных выше условиях для сечений 1-1, с-с и 2-2 получим:

$$w_1 = w_2, \quad \frac{w_2}{w_c} = \frac{\varepsilon F_1}{F_2}. \quad (5)$$

Далее, решая систему уравнений (3-5), находим значение коэффициента местного гидравлического сопротивления стабилизаторов пламени:

$$\zeta_1 = \frac{2 \cdot \Delta P^*}{\rho w_1^2} = \left( \frac{F_2}{\varepsilon \cdot F_1} - 1 \right)^2 = \left( \frac{1}{\varepsilon \cdot (1 - \bar{f}_{\text{ст}})} - 1 \right)^2. \quad (6)$$

Рассмотрим формулу (6) более детально. Для потерь полного давления из формулы (6) с учетом (5) получим:

$$\begin{aligned} \Delta P^* &= \frac{\rho w_1^2}{2} \cdot \left( \frac{F_2}{\varepsilon F_1} - 1 \right)^2 = \frac{\rho w_2^2}{2} \cdot \left( \frac{w_c}{w_2} - 1 \right)^2 = \\ &= \frac{\rho \cdot (w_c - w_2)^2}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Формула (7) является формулой Борда для потерь полного давления при внезапном расширении потока. Таким образом, полученный результат показывает, что потери полного давления вследствие местных гидравлических потерь при обтекании V-образного стабилизатора равны потерям при внезапном расширении потока с сечения с-с до сечения 2-2.

Из формулы (6) следует, что коэффициент местного гидравлического сопротивления рассмотренной двухмерной решетки из каскада равномерно расположенных V-образных стабилизаторов пламени при условии течения несжимаемого газа и равномерном профиле скорости в поперечном сечении потока зависит от степени затенения потока решеткой стабилизаторов  $\bar{f}_{\text{ст}}$  и коэффициента заполнения сечения  $\varepsilon$ .

Степень затенения стабилизаторами  $\bar{f}_{\text{ст}}$  является геометрическим параметром и однозначно определяется шириной V-образных стабилизаторов и шагом их расположения в системе решетки. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо теоретически определить зависимость для коэффициента заполнения сечения  $\varepsilon$ .

Таким образом, задача теоретического исследования потерь полного давления при местном гидравлическом сопротивлении фронтального устройства форсажной камеры сгорания в виде решетки V-образных стабилизаторов сводится к следующему: для каскада решетки V-образных стабилизаторов пламени с углом при вершине  $\Theta = 2\varphi$  и степенью

затенения потока  $\bar{f}_{\text{ст}} = \frac{h}{H}$  при обтекании равномерным потоком газа с направлением перпендикулярным ширине стабилизаторов необходимо определить коэффициент заполнения сечения

$$\varepsilon = \frac{F_c}{F_1} = \frac{H - Z}{H - h}.$$

Рассмотрим более детально течение газа на участке 1-с. Как и ранее, будем рассматривать двухмерное течение несжимаемого газа, с равно-

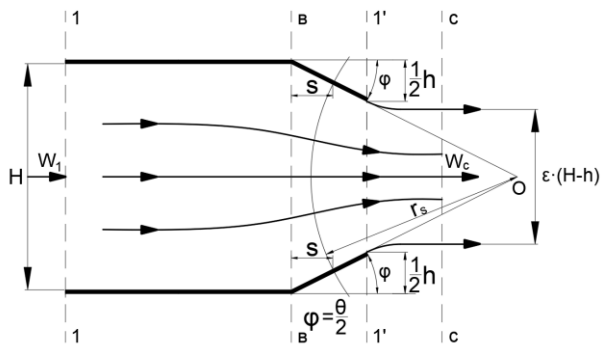


Рис. 3. Схема обтекания стабилизатора пламени на участке 1-с

мерной скоростью в сечениях 1-1 и с-с, нормально направленной по отношению к ширине стабилизаторов (см. рисунок 3).

Для определения коэффициента заполнения сечения необходимо решить систему уравнений, состоящих из уравнения неразрывности, сохранения импульса и энергии для данного участка. Уравнение сохранения импульса в комплексе с уравнением неразрывности в этом случае для участка 1-с будет иметь вид:

$$P_1 F_1 + \rho w_1^2 F_1 = P_c F_c + \frac{\rho w_1^2 F_1^2}{F_c} + R, \quad (8)$$

где  $R$  – сила от давления, действующая со стороны стабилизатора на поток.

На участке 1-с поток ускоряется по причине уменьшения площади поперечного сечения канала, течение на данном участке безотрывное и не имеет потерь полного давления. Поэтому согласно закону сохранения энергии и условию неразрывности потока, для участка 1-с будем иметь:

$$P_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = P_c + \frac{\rho w_c^2}{2} = P_c + \frac{\rho w_1^2 F_1^2}{2 \cdot F_c^2}. \quad (9)$$

Для решения системы уравнений (8) и (9) необходимо определить силу  $R$ . Чтобы определить силу от давления, действующую со стороны стабилизатора на поток, необходимо найти распределение статического давления вдоль стенки V-образного стабилизатора. Для решения этой задачи течение газа на участке 1-1' будем рассматривать как двухмерное потенциальное течение, при котором деформация и перемещение малого объема газа происходит без вращения и вихреобразования. Как известно, необходимым и достаточным условием потенциальности двухмерного течения является равенство:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (10)$$

Покажем, что данное условие выполняется, если линии тока на участке в-1' радиально направлены в центр окружности, который определяется точкой пересечения образующих V-образного стабилизатора  $O$ , а дуги окружностей, проведенных из точки  $O$  и ограниченные образующими V-образного стабилизатора являются изолиниями скорости (см. рисунок 3). Для описанного случая для скорости на дуге окружности с радиусом  $r_s = \sqrt{x^2 + y^2}$  из условия неразрывности течения получим:

$$w_1 H = w_s 2\varphi r_s, \quad w_s = \frac{w_1 H}{2\varphi \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (11)$$

Следовательно, для компонент скорости  $v$  и  $u$  будем иметь:

$$v = \frac{w_1 H x}{2\varphi (x^2 + y^2)}, \quad u = \frac{w_1 H y}{2\varphi (x^2 + y^2)}. \quad (12)$$

В итоге будем иметь:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{-2w_1 H xy}{2\varphi (x^2 + y^2)^2}. \quad (13)$$

Равенство (13) доказывает, что для потенциального двухмерного течения на участке в-1' рисунка 3 линии тока радиально направлены в центр окружности, который определяется точкой пересечения образующих V-образного стабилизатора  $O$ , а дуги окружностей, проведенных из точки  $O$  и ограниченные образующими V-образного стабилизатора являются изолиниями скорости.

Поэтому на участке в-1' из условия неразрывности течения и сохранения полного давления будем иметь:

$$w_1 F_1 = w_s F_s; \quad w_1 H_1 = w_s 2\varphi r_s;$$

$$r_s = \frac{H/2 - s \cdot \operatorname{tg}\varphi}{\sin\varphi}; \quad w_s = \frac{w_1 H \sin\varphi}{2\varphi(H/2 - s \cdot \operatorname{tg}\varphi)}, \quad (14)$$

$$P_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = P_s + \frac{\rho w_s^2}{2};$$

$$P_s = P_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} - \frac{\rho w_1^2 H^2 \sin^2\varphi}{8\varphi^2(H/2 - s \cdot \operatorname{tg}\varphi)^2}. \quad (15)$$

Зная распределение статического  $P_s$  вдоль обтекающей поверхности V-образного стабилизатора методом интегрирования найдем силу от давления, действующая со стороны стабилизатора на поток:

$$R = 2 \cdot \int_0^{\frac{h}{2\operatorname{tg}\varphi}} P_s \cdot L \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot ds =$$

$$= 2 \cdot \int_0^{\frac{h}{2\operatorname{tg}\varphi}} \left( P_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} - \frac{\rho w_1^2 H^2 \sin^2\varphi}{8\varphi^2(H/2 - s \cdot \operatorname{tg}\varphi)^2} \right) L \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot ds =$$

$$= \left( P_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} \right) \cdot (F_1 - F_1') - \frac{\rho w_1^2 \sin^2\varphi F_1 \left( \frac{F_1}{F_1'} - 1 \right)}{2\varphi^2} \quad (16)$$

Таким образом, условия потенциальности течения и сохранения полного давления на участке в-1' рисунка 3 позволяют определить зависимость (16) для силы давления, действующая со стороны стабилизатора на поток, от геометрических характеристик V-образного стабилизатора и параметров набегающего на него потока.

Теперь система уравнений (8) и (9) является замкнутой и ее решение имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{F_c}{F_1}; \quad A\varepsilon^2 - 2\varepsilon + 1 = 0;$$

$$A = 1 - \bar{f}_{\text{CT}} + \bar{f}_{\text{CT}} \cdot \left( \frac{\sin\varphi}{\varphi} \right)^2 \quad (17)$$

Решение квадратного уравнения (17) для коэффициента заполнения сечения  $\varepsilon$  имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{1}{A} - \sqrt{\frac{1}{A^2} - \frac{1}{A}}; \quad A = 1 - \bar{f}_{\text{CT}} + \bar{f}_{\text{CT}} \cdot \left( \frac{\sin\varphi}{\varphi} \right)^2. \quad (18)$$

### Результаты работы

В результате решения задачи теоретического исследования потерь полного давления при местном гидравлическом сопротивлении фронтного устройства прямоочной камеры сгорания в виде решетки V-образных стабилизаторов сформирована аналитическая математическая модель для определения значения коэффициента местного гидравлического сопротивления, которая описывается зависимостями

(6) и (18). Получено, что коэффициент местного гидравлического сопротивления решетки V-образных стабилизаторов зависит от степени затенения потока стабилизаторами  $\bar{f}_{\text{CT}} = \frac{h}{H}$  и угла при вершине V-образных стабилизаторов пламени  $\Theta = 2\varphi$ .

Зависимости коэффициента местного гидравлического сопротивления  $\xi_1$  от степени затенения  $\bar{f}_{\text{CT}} = \frac{h}{H}$  и угла при вершине V-образных стабилизаторов пламени  $\Theta = 2\varphi$ , рассчитанные по формулам (6) и (18), показаны на рисунках 4 и 5 сплошными линиями.

На рисунке 4 пунктирной линией показана зависимость для коэффициента местного гидравлического сопротивления, представленная в работе [18]:

$$\frac{Z}{H} = 1 - \varepsilon \cdot (1 - \bar{f}_{\text{CT}}) \cong \bar{f}_{\text{CT}} + (1 - \sqrt{\bar{f}_{\text{CT}}}) \sqrt{\bar{f}_{\text{CT}}} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (19)$$

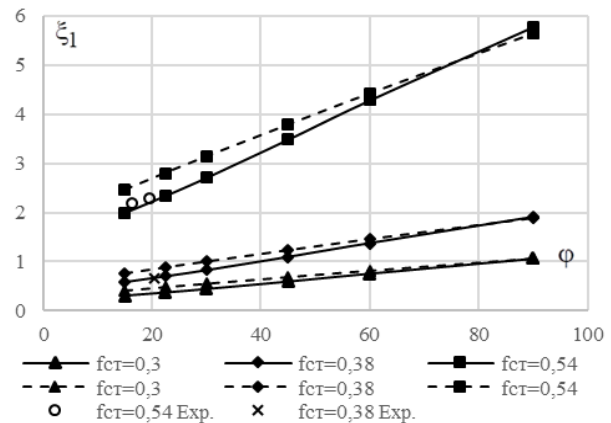


Рис. 4. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления

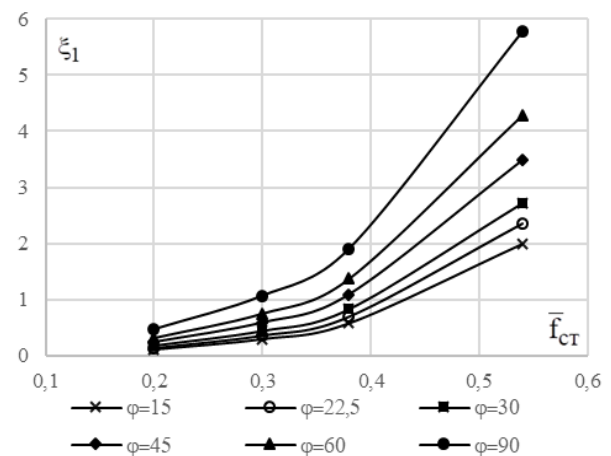


Рис. 5. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления

Зависимость (19) была получена в результате аппроксимации графического решения, которое в свою очередь было определено путем использования теории Гельмгольца и Кирхгофа для свободного потока [19].

Также на рисунке 4 показаны значения коэффициента местного гидравлического сопротивления, полученные экспериментально в работе [20].

Из представленных на рисунках 4 и 5 зависимостей видно, что коэффициент местного гидравлического сопротивления зависит от угла при вершине V-образного стабилизатора практически линейно, а темп нарастания коэффициента местного гидравлического сопротивления по мере увеличения степени затенения увеличивается. Также из рисунка 4 видно, что для малых углов при вершине V-образного стабилизатора зависимость (19) завышает на величину от 18 % до 27 % значение коэффициента местного гидравлического сопротивления относительно значений, полученных с использованием зависимостей (6) и (18), которые, в свою очередь, удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными [8]. Для  $\varphi = 90$  градусов, то есть для случая, когда стабилизатор пламени представляет собой плоскую пластину, значения коэффициента местного гидравлического сопротивления, рассчитанные по зависимости (19) и по представленной в данной работе математической модели, отличаются на величину не более 2,5 %.

Таким образом, разработанная в данной работе аналитическая математическая модель, описывающая зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления от размера и формы стабилизаторов, удовлетворительно сходится с экспериментальными данными и обеспечивает более высокую точность расчетов для малых значений углов при вершине V-образного стабилизатора по сравнению с аппроксимирующей зависимостью (19). Полученные в работе результаты дополняют существующие теоретические и экспериментальные исследования, а новизна результатов работы заключается в усовершенствовании существующих методик расчета коэффициента гидравлического сопротивления V-образных стабилизаторов пламени, что позволяет повысить точность расчетов.

Полученные результаты для зависимости коэффициента сужения струи позволяют определить аэродинамическое затенение стабилизаторов и поэтому могут быть также использованы для оценки характеристик срыва пламени при использовании методов, представленных в работах [21-22].

В качестве перспектив дальнейшего исследования следует отметить необходимость рассмотрения влияния трения о стенки стабилизатора на коэффициент сужения струи, а, следовательно, и на вели-

чину гидравлического сопротивления стабилизаторов вследствие гидравлического удара.

## Выводы

В результате проведенной работы разработана аналитическая математическая модель, описывающая зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления стабилизаторов пламени от их размера и формы. Получено, что для V-образных стабилизаторов пламени коэффициент местного гидравлического сопротивления зависит от степени затенения потока стабилизаторами  $\bar{f}_{ст} = \frac{h}{H}$  и угла при вершине V-образных стабилизаторов пламени  $\Theta = 2\varphi$ .

Рассчитанные по разработанной математической модели коэффициенты местного гидравлического сопротивления удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными и обеспечивают более высокую точность для малых значений углов при вершине V-образного стабилизатора по сравнению с аппроксимирующей зависимостью (19). Полученные результаты проведенных исследований дополняют существующие теоретические и экспериментальные исследования, позволяют повысить точность расчетов потерь полного давления при обтекании V-образных стабилизаторов пламени.

Использование разработанной математической модели расчета коэффициента местного гидравлического сопротивления возможно в рамках уже разработанных методов выбора геометрических размеров фронтального устройства и длины камеры сгорания на начальных этапах проектирования.

Перспектива дальнейшего исследования заключается в необходимости рассмотрения влияния трения о стенки стабилизатора на коэффициент сужения струи, а, следовательно, и на величину гидравлического сопротивления стабилизаторов вследствие гидравлического удара.

## Литература

1. Henzel, J. G. *Investigation of effect of number and width of annular flame-holder gutters on afterburner performance [Text] / J. G. Henzel, L. Bryant. – Washington : NACA, 1954. – 26 p.*
2. Foster, J. R. *Effect of combustion chamber blockage on bluff body flame stabilization [Text] / J. R. Foster. – Pasadena : California Institute of Technology, 1956. – 42 p.*
3. Wright, F. H. *Flame spreading from bluff-body flameholders [Text] / F. H. Wright, E. E. Zukoski //*

*Symposium (International) on Combustion*. – 1961. – Vol. 8, Iss. 1. – P. 933–943.

4. Nakanishi, S. An investigation of effect of flameholder gutter shape on afterburner performance [Text] / S. Nakanishi, W. W. Velie, L. Bryant. – Washington : NACA, 1954. – 49 p.

5. detailed investigation of bluff body stabilized flames [Text] / B. Kiel, K. Garwick, J. R. Gord [et al.] // 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – Reno, 2007. – P. 1–10.

6. Haider, B. A. Preliminary design of a Short afterburner for Single-Spool Expendable Turbojet Engine [Text] / B. A. Haider, N. Davidovic, N. Durrani // 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – Orlando, 2011. – P. 1–11.

7. Козел, Д. В. Выбор геометрических характеристик фронтального устройства и длины камеры сгорания прямоточного типа [Текст] / Д. В. Козел // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4sup2 (174). – С. 19–28. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup2.03.

8. A methodology for afterburner evaluation [Text] / J. J. Isaac, N. R. Ramesh, V. S. Krishnakumar [et al.] // *The 3<sup>rd</sup> National Conference on Air Breathing Engines and Aerospace Propulsion*. – Madras, 1996. – P. 1–12.

9. Сенюшкин, Н. С. Метод проектирования форсажных камер для начальных стадий разработки ВРД [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 : защищена 25.09.2009 / Сенюшкин Николай Сергеевич. – Уфа, 2009 – 151 с.

10. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей [Текст] / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1964. – 527 с.

11. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей [Текст] : учеб. для вузов / В. М. Акимов, В. И. Бакулев, Р. И. Курзинер [и др.] ; под ред. С. М. Шляхтенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1987. – 568 с.

12. Старцев, Н. И. Проектирование форсажной камеры ТРДДФ [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Н. И. Старцев, Ю. И. Цыбилов. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2012. – 49 с.

13. Ярмаш, А. Д. Методика оценки характеристик стабилизирующих устройств форсажных камер сгорания турбореактивных двигателей [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 : защищена 28.12.2021 / Ярмаш Александр Дмитриевич. – М., 2021. – 111 с.

14. Коломзаров, О. В. Влияние способа задания входных граничных условий на результаты моделирования потока за уголковым стабилизатором пламени [Текст] / О. В. Коломзаров, В. М. Анисимов,

И. А. Зубрилин // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2015. – № 2, Т. 14. – С. 97–105.

15. Sathish, D. CFD analysis of improving Thrust in Afterburner by configuration changes [Text] / D. Sathish // *Global journal for research analysis*. – 2014. – Vol. 3, Iss. 11. – P. 34–38.

16. Логинов, В. В. Моделирование течения в форсажной камере сгорания авиационного двигателя [Текст] / В. В. Логинов, В. И. Рублев // *Интегрированные технологии и энергосбережение*. – 2004. – № 4. – С. 60–66.

17. Идельчик, И. Е. Гидравлические сопротивления [Текст] / И. Е. Идельчик. – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 316 с.

18. Mattingly, J. D. Aircraft Engine Design [Text] : AIAA education series / J. D. Mattingly, W. H. Heiser, D. T. Pratt. – 2nd ed. – Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002. – 691 p.

19. Cornell, W. G. The flow in a Vee-gutter cascade [Text] / W. G. Cornell // *The American Society of Mechanical Engineers*. – 1956. – Vol. 78, Iss. 3. – P. 573–580.

20. Sterbentz, W. H. A Analysis and experimental observation of pressure losses in ram-jet combustion chambers [Text] / W. H. Sterbentz. – Washington : NACA, 1949. – 22 p.

21. Lefebvre, A. H. A method of predicting the aerodynamic blockage of bluff bodies in a ducted airstream [Text] / A. H. Lefebvre, M. I. Mech. – Cranfield : The College of Aeronautics, 1965. – 13 p.

22. Gordon, C. O. Aerothermodynamics of aircraft engine components / C. O. Gordon – AIAA education series. – Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1985. – 551 p.

## References

1. Henzel, J. G., Bryant, L. Investigation of effect of number and width of annular flame-holder gutters on afterburner performance. Washington, NACA, 1954. 26 p.

2. Foster, J. R. Effect of combustion chamber blockage on bluff body flame stabilization. Pasadena, California Institute of Technology, 1956. 42 p.

3. Wright, F. H., Zukoski, E. E. Flame spreading from bluff-body flameholders. *Symposium (International) on Combustion*, 1961, vol. 8, Iss. 1, pp. 933–943.

4. Nakanishi, S., Velie, W. W., Bryant, L. An investigation of effect of flame-holder gutter shape on afterburner performance. Washington, NACA, 1954. 49 p.

5. Kiel, B., Garwick, K., Gord, J. R., Miller, J., Lynch, A. A., Hill, R., Phillips, S. A detailed investigation of bluff body stabilized flames. 45<sup>th</sup> AIAA Aero-



*space Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, 2007, pp. 1-10.

6. Haider, B. A., Davidovic, N., Durrani, N. Preliminary design of a Short afterburner for Single-Spool Expendable Turbojet Engine. *49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, 2011, pp. 1–11.

7. Kozel, D. V. Vybory geometricheskikh kharakteristik frontovogo ustroystva i dliny kamery sgoraniya pryamotchnogo tipa [The geometric characteristics of the front and the length selection of the combustion chamber of direct flow type]. *Aviacionno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4sup2 (174), pp. 19-28. DOI: 10.32620/aktt.2021.4sup2.03.

8. Isaac, J. J., Ramesh, N. R., Krishnakumar, V. S., Rajashekar, C., Shyamsundar, S. R., Haran, A. P., Sundararajan, V. A methodology for afterburner evaluation. *The 3<sup>rd</sup> National Conference on Air Breathing Engines and Aerospace Propulsion*, Madras, 1996, pp. 1-12.

9. Senyushkin, N. S. *Metod proektirovaniya forsazhnykh kamer dlya nachal'nykh stadii razrabotki VRD*. Dis. kand. tekhn. Nauk [Method for afterburners designing for the initial stages of development of jet engine]. Ufa, 2009. 151 p.

10. Raushenbah, B. V., Belyj, S. A., Bepalov, I. V., Borodachev, V. Ja., Volynskij, M. S., Prudnikov, A. G. *Fizicheskie osnovy rabocheho processa v kamerah sgoraniya vozdušno-reaktivnykh dvigatelej* [Physical foundations of the working process in the combustor of air-jet engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 527 p.

11. Akimov, V. M., Bakulev, V. I., Kurziner, R. I., Polyakov, V. V., Sosunov, V. A., Shlyakhtenko, S. M. *Teoriya i raschet vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* [Theory and calculation of air-jet engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 568 p.

12. Startsev, N. I., Tsybizov, Yu. I. *Proektirovanie forsazhnoi kamery TRDDF* [Designing of the turbofan engine afterburner]. Samara, Samar. gos. aerokosm. un-t im. S. P. Koroleva, 2012. 49 p.

13. Yarmash, A. D. *Metodika otsenki kharakteristik stabiliziruyushchikh ustroystv forsazhnykh kamer*

*sgoraniya turboreaktivnykh dvigatelei*. Diss. kand. tekhn. nauk [Method for assessing the characteristics of stabilizing devices for turbo-jet engines afterburner combustion chambers. PhD diss]. Moscow, 2021. 111 p.

14. Kolomzarov, O. V., Anisimov, V. M., Zubrilin, I. A., Vliyanie sposoba zadaniya vkhodnykh granichnykh uslovii na rezul'taty modelirovaniya potoka za ugolkovym stabilizatorom plameni [The Method of setting the input boundary conditions influence on the results of modeling the flow behind the corner flame stabilizer]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2015, no. 2, vol. 14, pp. 97–105.

15. Sathish, D. CFD analysis of improving Thrust in Afterburner by configuration changes. *Global journal for research analysis*, 2014, vol. 3, iss. 11, pp. 34–38.

16. Loginov, V. V. Modelirovanie techeniya v forsazhnoi kamere sgoraniya aviatsionnogo dvigatelya [Simulation of the flow in the aircraft engine afterburner]. *Integrirovannye tekhnologii i energosberezhenie - Integrated Technologies and Energy Saving*, 2004, no. 4, pp. 60–66.

17. Idel'chik, I. E. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic resistance]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1954. 316 p.

18. Mattingly, J. D., Heiser, W. H., Pratt, D. T. *Aircraft Engine Design*. AIAA education, 2nd ed., Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002. 691 p.

19. Cornell, W. G. The flow in a Vee-gutter cascade. *The American Society of Mechanical Engineers*, 1956, Volume 78, Issue 3, pp. 573–580.

20. Sterbentz, W. H. *A Analysis and experimental observation of pressure losses in ram-jet combustion chambers*. Washington, NACA, 1949. 22 p.

21. Lefebvre, A. H., Mech, M. I. A method of predicting the aerodynamic blockage of bluff bodies in a ducted airstream. *The College of Aeronautics*, 1965, 13 p.

22. Gordon, C. O. Aerothermodynamics of aircraft engine components. *AIAA education series*, Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1985. 551 p.

Надійшла до редакції 4.05.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

## ВПЛИВ ФОРМИ І РОЗМІРІВ СТАБІЛІЗАТОРІВ ПОЛУМ'Я КАМЕРИ ЗГОРАННЯ ПРЯМОТІЛЬНОГО ТИПУ НА ГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Д. В. Козел

Камерами згорання прямоїчного типу є форсажні камери згорання, які застосовуються для короткочасного збільшення тяги газотурбінного двигуна для зльоту, здійснення маневрів та подолання літаком звукового бар'єру та його польоту із надзвуковою швидкістю. Також, прямоїчні камери згорання застосовуються

у складі прямоточних повітряно-реактивних двигунів як основні камери згоряння, в яких забезпечується процес спалювання палива і підведення тепла до робочого тіла. В результаті вирішення задачі теоретичного дослідження втрат повного тиску при місцевому гідравлічному опорі фронтового пристрою прямоточної камери згоряння у вигляді ґрат V-подібних стабілізаторів сформована математична модель розрахунку значення коефіцієнта місцевого гідравлічного опору. Отримано, що коефіцієнт місцевого гідравлічного опору ґрат V-подібних стабілізаторів залежить від ступеня затінення потоку стабілізаторами і кута при вершині V-подібних стабілізаторів полум'я. Проведено аналіз впливу розмірів та форми стабілізаторів полум'я фронтового пристрою на гідравлічні характеристики. В результаті аналізу встановлено, що коефіцієнт місцевого гідравлічного опору залежить від кута при вершині V-подібного стабілізатора практично лінійно, а темп наростання коефіцієнта місцевого гідравлічного опору зі збільшенням ступеня затінення збільшується. Розраховані за розробленою математичною моделлю коефіцієнти місцевого гідравлічного опору задовільно сходяться з експериментальними даними. Використання розробленої математичної моделі розрахунку коефіцієнта місцевого гідравлічного опору можливе в рамках методу вибору геометричних розмірів фронтового пристрою та довжини камери згоряння на початкових етапах проектування.

**Ключові слова:** прямоточна камера згоряння; стабілізатори полум'я; фронтовий пристрій; втрати повного тиску.

### THE SHAPE AND DIMENSIONS OF FLAME STABILIZERS OF A DIRECT-FLOW TYPE COMBUSTION CHAMBER INFLUENCE ON THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS

*Dmitry Kozel*

Direct-flow combustion chambers are afterburner combustion chambers, which are used to short-term increase the thrust of a gas turbine engine for takeoff, maneuvering and overcoming the sound barrier by an aircraft and its flight at supersonic speed. Also, direct-flow combustion chambers are used as part of ramjet engines as the main combustion chambers, in which the process of fuel combustion and heat supply to the working fluid is ensured. Because to solve the problem of theoretical study of total pressure losses with local hydraulic resistance of the front device of a direct-flow combustion chamber in the form of a lattice of V-shaped stabilizers, a mathematical model for calculating the value of the local hydraulic resistance coefficient was formed. It was found that the coefficient of local hydraulic resistance of the lattice of V-shaped stabilizers depends on the degree of shading of the flow by stabilizers and the angle at the top of the V-shaped flame stabilizers. An analysis was made of the influence of the size and shape of the flame stabilizers of the front device on the hydraulic characteristics. Because of the analysis, it was found that the coefficient of local hydraulic resistance depends on the angle at the top of the V-shaped stabilizer almost linearly, and the rate of increase in the coefficient of local hydraulic resistance increases as the degree of shading increases. The coefficients of local hydraulic resistance calculated according to the developed mathematical model agree satisfactorily with the experimental data. The use of the developed mathematical model for calculating the coefficient of local hydraulic resistance is possible within the framework of the front device geometric dimensions and the combustion chamber length method selection at the initial stages of designing.

**Keywords:** direct-flow combustion chamber; flame stabilizers; front device; total pressure loss.

**Козел Дмитрій Вікторович** – заступитель начальника отдела, руководитель расчетно-экспериментальной группы отдела камер сгорания, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

**Dmitry Kozel** – deputy Head of Department, head of design-experimental group of the combustion chambers department, SE Ivchenko-Progress, Zaporizhzhia, Ukraine,  
e-mail: 03503@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0002-7295-2284.