

5. Седов Л. И., Черный Г. Г. Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах. В сб.: «Теоретическая гидромеханика». Вып. 12. М., Оборонгиз, 1954.

6. Еременко А. С., Завалко А. Г. Об осреднении неравномерного пространственного потока. В сб.: «Гидромеханика и теория упругости», Вып. 9, Харьков, 1958.

Е. Д. Стенькин

МЕТОД ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- G — расход воздуха;
 M — масса воздуха в ресивере;
 V — объем ресивера;
 C — скорость;
 P — давление;
 T — температура;
 ρ — плотность;
 R — газовая постоянная;
 a — скорость звука;
 Re — число Рейнольдса;
 ν — коэффициент кинематической вязкости;
 d — внутренний диаметр трубопровода;
 f — площадь проходного сечения трубопровода;
 e — длина трубопровода;
 n — число датчиков;
 m — число датчиков, регистрирующих давление воздуха, вытекающего в ресивер;
 τ — время.

ИНДЕКСЫ

Верхние

- * — полный параметр;
(1), (k) — соответственно 1-е и k -е приближения;

Нижние

- 1 — начальное значение;
2 — конечное значение;
 i, q — номер датчика;
+ — параметр воздуха, вытекающего в ресивер;
— — параметр воздуха, вытекающего из ресивера;
 k — командное;
 n — переходный режим;
 p — ресивер;
 y — установившийся режим.

При неблагоприятных условиях эксплуатации на входе в турбореактивный двигатель возникает значительная неравномерность полей давлений и температур в воздушном потоке.

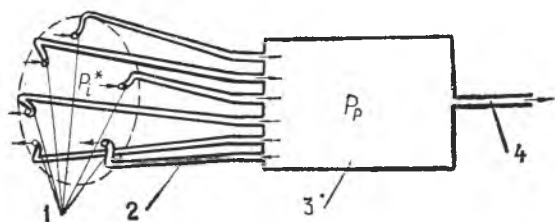


Рис. 1. Схема «датчики—трубопроводы—ресивер»:
 1 — датчик; 2 — трубопроводы подвода давления от датчика к ресиверу; 3 — ресивер; 4 — трубопровод командного давления

Неравномерность поля давлений может быть вызвана возмущениями в атмосфере (боковой ветер, вихревые течения), близостью входного сечения воздухозаборника к поверхности фюзеляжа, к земле, а также особенностями очертаний тракта и работы воздухозаборника.

Взаимодействие неравномерного потока с лопаточными веннами компрессора может приводить к уменьшению запасов газодинамической устойчивости двигателя вследствие возрастания местных углов атаки, приводящего к срыву потока в лопаточных веннах.

Для обеспечения достаточных запасов устойчивости нужно иметь средства воздействия на компрессор, для чего необходима система датчиков, регистрирующая состояние потока. Одна из таких систем содержит датчики давления, расположенные перед компрессором и соединенные длинными трубопроводами с ресивером (рис. 1).

При неравномерном поле давлений перед датчиками через трубопроводы и ресивер воздух будет перетекать из области высокого давления в область низкого давления. В результате в ресивере установится некоторое промежуточное давление, которое используется в качестве командного для агрегата управления режимом работы двигателя.

При этом существенно, чтобы было однозначное соответствие между значением командного давления и совокупностью значений давлений, замеренных датчиками, независимо от их взаимного расположения в мерном сечении. Очевидно, что чем больше отношение поперечного сечения ресивера к сумме площадей сечений трубопроводов, тем в большей степени обеспечивается это однозначное соответствие. Однако при увеличении указанного отношения увеличивается отношение объема ресивера к секундному расходу воздуха через него, что приводит к увеличению времени запаздывания изменения давления в ресивере при изменении поля давлений перед датчиками.

Целью данного расчетного исследования является разработка метода, позволяющего устанавливать соотношения между основными размерами и параметрами системы «датчики — трубопроводы — ресивер» и, в частности, определять время запаздывания изменения давления в ресивере после изменения давления перед датчиками.

Задача формулируется следующим образом.

По известному неравномерному полю давлений перед датчиками, соединенными длинными трубопроводами с ресивером, требуется определить давление в ресивере на установившемся режиме и изменение во времени давления в ресивере, если перед датчиками поле давлений p_{1i}^* (или p_{1i}) мгновенно изменяется на поле давлений p_{2i}^* (или p_{2i}).

Вначале выведем соотношения для определения давления в ресивере $p_{p.y}$ на установившемся режиме. Для этого используем условие равенства расходов воздуха, втекающего в ресивер и вытекающего из него.

Рассмотрим случай, представляющий интерес для данного исследования, когда имеем значительную величину отношения площади поперечного сечения ресивера к суммарной площади поперечного сечения трубопроводов. В этом случае можно принять, что полное и статическое давление в ресивере и статическое давление в сечении трубопровода в месте его соединения с ресивером одинаковы.

Условие равенства расходов запишется в виде

$$\sum_{i(+)=1}^m G_{(+i)} = \sum_{i(-)=1}^{n-m} G_{(-i)}, \quad (1)$$

где

$$G_i = f_i p_i C_i.$$

В соответствии с физическим смыслом задачи

$$f_i = f = \text{idem}; \quad l_i = l = \text{idem}.$$

Для определения скоростей C_i рассмотрим уравнения Бернулли для участка тракта между сечениями на входе в датчики и в ресивер (для определенности соотношения записываем для случая, когда датчики измеряют p^*). Для датчиков, через которые воздух втекает в ресивер

$$p_{(+i)}^* = p_{p.y} + \frac{(\rho C^2)_{(+i)}}{2} (1 + \zeta_{(+i)}), \quad (2)$$

для датчиков, через которые воздух вытекает из ресивера

$$p_{p.y} = p_{(-i)}^* + \frac{(\rho C^2)_{(-i)}}{2} (1 + \zeta_{(-i)}). \quad (3)$$

Из равенств (2) и (3) для соответствующих скоростей получаем формулы:

$$C_{(+i)} = \sqrt{\frac{2(P_{(+i)}^* - P_{p,y})}{\rho_{(+i)}^* (1 + \zeta_{(+i)})}}; \quad (4)$$

$$C_{(-i)} = \sqrt{\frac{2(P_{p,y} - P_{(-i)}^*)}{\rho_p (1 + \zeta_{(-i)})}}, \quad (5)$$

где ζ — коэффициент сопротивления, учитывающий суммарные потери давления в датчике, трубопроводе, ресивере.

Предполагая малыми отношения скоростей потока к скорости звука, в формулах (4) и (5) без особой погрешности можно принять

$$\rho_{(+i)} = \rho_{(+i)}^*; \quad \rho_{(-i)} = \rho_p = \rho_{p,y}. \quad (6)$$

Подставляя формулы (4), (5), (6) в соответствующие слагаемые соотношения (1), получаем выражение, в которое входит неизвестное давление $p_{p,y}$

$$\begin{aligned} & \sum_{i_{(+)}=1}^m f_{(+i)} \sqrt{\frac{\rho_{(+i)}^*}{1 + \zeta_{(+i)}} (P_{(+i)}^* - P_{p,y})} = \\ & = \sum_{i_{(-)}=1}^{n-m} f_{(-i)} \sqrt{\frac{\rho_p}{1 + \zeta_{(-i)}} (P_{p,y} - P_{(-i)}^*)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты сопротивления, входящие в соотношения (4), (5), (7), представляют собой суммы:

$$\zeta_i = \sum_{q=1}^{z_i} \zeta_{qi} + \zeta_{\text{тр}i}, \quad (8)$$

где ζ_{qi} — коэффициент местного q -го сопротивления i -й линии «датчик—трубопровод—ресивер»;

z_i — число местных сопротивлений в i -й линии;

$\zeta_{\text{тр}i}$ — коэффициент сопротивления трения в i -й линии.

Коэффициент ζ_{qi} определяется по справочнику [3], а коэффициент $\zeta_{\text{тр}i}$ по формуле

$$\zeta_{\text{тр}i} = \lambda_{\text{тр}i} \left(\frac{l}{d} \right)_i, \quad (9)$$

где $\lambda_{\text{тр}i}$ — коэффициент сопротивления трения на одном калибре длины. При расчете в первом приближении следует принимать $\lambda_{\text{тр}}^{(1)} = 0,04$.

Рассматриваемая система имеет следующие особенности: датчики расположены по окружности во входном сечении двигателя; для обеспечения идентичности влияния измерения давления раз-

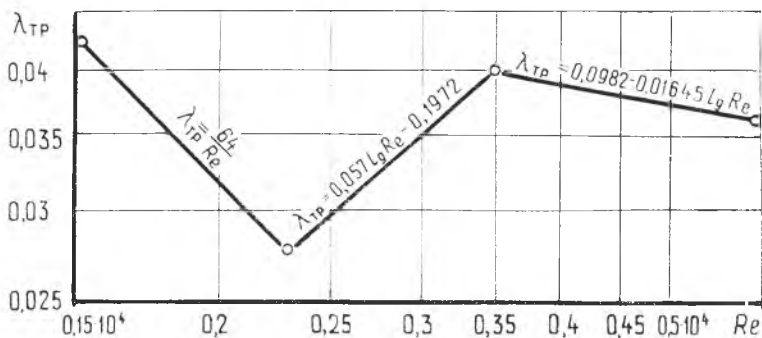


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления трения от числа Re при течении в гладкой трубе

личными датчиками на давление в ресивере соединительные трубопроводы имеют одинаковую длину, а из условий малого веса и габаритов — малый диаметр. Вследствие этого число калибров трубопроводов будет значительным, что определяет во всем сопротивлении значительную долю сил трения, распределенных по внутренней поверхности трубопровода.

Предварительный анализ показывает, что при течении в трубопроводах числа Re изменяются в диапазоне

$$Re = 0,1 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^4.$$

В таком диапазоне чисел Re величина $\lambda_{тр}$, как это следует из работы [1], изменяется довольно значительно. Для учета зависимости $\lambda_{тр} = f(Re)$, график, приведенный на рис. 20.1 в работе [1], в несколько упрощенном виде перестроен на рис. 2 по реперным точкам, указанным на этом рисунке. Аналитически этот график описывается следующими соотношениями.

Ламинарное течение:

при $Re < 0,23 \cdot 10^4$

$$\lambda_{тр} = \frac{64}{Re} \text{ — формула Хагена-Пуазейля.} \quad (10)$$

Турбулентное течение:

при $0,23 \cdot 10^4 \leq Re < 0,35 \cdot 10^4$

$$\lambda_{тр} = 0,067 \lg Re - 0,1972; \quad (11)$$

при $0,35 \cdot 10^4 \leq Re < 5 \cdot 10^4$

$$\lambda_{тр} = 0,0982 - 0,01645 \lg Re. \quad (12)$$

Для расчета $\lambda_{тр}$ число Re определяется по известной формуле

$$e = \frac{\rho C d}{\mu}, \quad (13)$$

где

$$\mu = 0,467 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{T}{100} \right) \frac{\text{кгс} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}. \quad (14)$$

Выражение для μ получено с погрешностью не более 1% в результате аппроксимации табличной зависимости, приведенной в работе [2], для требуемого диапазона изменения температуры $T = 220 \div 500^\circ \text{K}$.

Из структуры выражения (7), а также выражений (10) ÷ (14) следует, что невозможно получить в явном виде формулу для определения давления $p_{p,y}$. Следовательно, это давление должно определяться методом последовательных приближений.

Сущность такого метода применительно к рассматриваемой задаче будет заключаться в следующем. По заданному давлению k -1-го приближения вычисляются расходы втекающего в ресивер и вытекающего из ресивера воздуха. Затем по разности между этими расходами нужно определить потребное изменение давления в ресивере для получения равенства расходов в следующем, k -м, приближении. Если модуль относительной величины этого изменения давления меньше или равен допустимой погрешности определения давления в ресивере, т. е.

$$\left| \frac{\Delta P_{p,y}^{(k-1)}}{P_{p,y}^{(k-1)} + \frac{\Delta P_{p,y}^{(k-1)}}{2}} \right| \leq \delta_p, \quad (15)$$

то на этом расчет заканчивается. В противном случае необходимо переходить к следующему приближению, используя очевидное соотношение

$$p_{p,y}^{(k)} = p_{p,y}^{(k-1)} + \Delta p_{p,y}^{(k-1)}, \quad (16)$$

в котором величина $\Delta p_{p,y}^{(k-1)}$ определяется по параметрам k -1-го приближения.

В первом приближении давление в ресивере определяется по соотношению

$$p_{p,y}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^*}{n}. \quad (17)$$

Соотношение (16), в соответствии с его назначением, обеспечивает переход от конца расчета предыдущего приближения к началу расчета последующего приближения. Поэтому его логично назвать формулой обратной связи. Для использования этой формулы необходима зависимость между величинами $\Delta p_{p,y}^{k-1}$ и ΔG ; из которых последняя определяется выражением

$$\Delta G = \sum_{i_{(+)}=1}^m G_{(+)}i - \sum_{i_{(-)}=1}^{n-m} G_{(-)}i. \quad (18)$$

Установим формулу обратной связи с применением искомой зависимости. Для этого продифференцируем выражение (18) по $p_{p.y}$. После преобразований получим следующее соотношение:

$$\frac{d(\Delta G)}{dp_{p.y}} = -\frac{1}{2} \left[\sum_{i_{(+)}=1}^m \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(+)i} - \sum_{i_{(-)}=1}^{n-m} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(-)i} \right], \quad (19)$$

где

$$\Delta p_{(+)i} = p_i^* - p_{p.y};$$

$$\Delta p_{(-)i} = p_{p.y} - p_i^*.$$

В общем случае возможны малые абсолютные величины Δp_i , меньшие минимально допустимой величины Δp_{\min} , т. е.

$$|\Delta p_i| < \Delta p_{\min},$$

и, в частности, возможны значения

$$\Delta p_i = 0.$$

Соответственно в этих случаях величины G_i тоже будут равняться нулю, т. е. в выражении (19) получится неопределенность вида $\frac{0}{0}$. Для исключения этой неопределенности такие слагаемые выделим в отдельные суммы, и выражение (19) запишем в конечных разностях в виде:

$$\begin{aligned} -2\Delta(\Delta G) = & \left[\sum_{i_{(+)}=1}^{m-r_{(+)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(+)i} - \sum_{i_{(-)}=1}^{n-m-r_{(-)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(-)i} \right] \Delta p_{p.y} + \\ & + \sum_{q_{(+)}=1}^{r_{(+)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(+)i} \Delta p_{p.y} - \sum_{q_{(-)}=1}^{r_{(-)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(-)q} \Delta p_{p.y}, \quad (20) \end{aligned}$$

где $r_{(+)}$ — число датчиков, измеряющих давление воздуха, вытекающего в ресивер, для которых $|\Delta p_q| < \Delta p_{\min}$;

$r_{(-)}$ — аналогичная величина для датчиков, измеряющих давление воздуха, вытекающего из ресивера; q — номер датчика выделенной группы.

Преобразуем слагаемые в последних двух суммах. При этом учтем, что при малых значениях Δp_q их следует вычислять по формулам

$$\Delta p_{(+)q} = p_{p.y} - \frac{p_{p.y}^{(k)} + p_{p.y}^{(k-1)}}{2}; \quad (21)$$

$$\Delta p_{(-)q} = \frac{p_{p.y}^{(k)} + p_{p.y}^{(k-1)}}{2} - p_{p.y}. \quad (22)$$

и что

$$p_{p,y} = p_q = p_{p,y}^{(k)} \quad (23)$$

Из соотношений (21), (22) и (23) получаем

$$\Delta p_{(+)q} = \frac{\Delta p_{p,y}}{2}, \quad \Delta p_{(-)q} = -\frac{\Delta p_{p,y}}{2}.$$

Третья и четвертая суммы в выражении (20) примут вид:

$$\sum_{q_{(+)=1}^{r_{(+)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(+)q} \Delta p_{p,y} = 2 \sum_{q_{(+)=1}^{r_{(+)}} G_{(+)q}; \quad (24)$$

$$\sum_{q_{(-)=1}^{r_{(-)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(-)q} \Delta p_{p,y} = -2 \sum_{q_{(-)=1}^{r_{(-)}} G_{(-)q}. \quad (25)$$

Подставляя полученные соотношения (24) и (25) в выражение (20), а также учитывая, что

$$\Delta p_{p,y} = p_{p,y}^{(k)} - p_{p,y}^{(k-1)}$$

и $\Delta(\Delta G) = \Delta G^{(k)} - \Delta G^{(k-1)} = -\Delta G^{(k-1)}$ (так как желательно иметь $\Delta G^{(k)} = 0$),

получаем формулу обратной связи:

$$p_{p,y}^{(k)} = p_{p,y}^{(k-1)} + 2 \frac{\Delta G^{(k-1)} - \sum_{q_{(+)=1}^{r_{(+)}} G_{(+)q} - \sum_{q_{(-)=1}^{r_{(-)}} G_{(-)q}}{z}, \quad (26)$$

где

$$z = \sum_{i_{(+)=1}^{m-r_{(+)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(+)i} - \sum_{i_{(-)=1}^{n-m-r_{(-)}} \left(\frac{G}{\Delta p} \right)_{(-)i}.$$

Далее рассмотрим соотношения для определения изменения давления в ресивере p_p и других параметров системы в зависимости от времени на переходных режимах.

С момента изменения поля давлений перед датчиками с p_{1i}^* на p_{2i}^* до начала переходного процесса в ресивере пройдет время, равное времени прохождения звуковой волны через трубопровод. Оно равно

$$\tau_{зв} = \frac{l}{a}, \quad (27)$$

где a — скорость звука, вычисляемая по формуле $a = \sqrt{\kappa RT}$; κ — показатель адиабаты.

Для исследования переходных режимов используем соотношения, определяющие изменение количества воздуха, находящегося

в ресивере, и соответствующего давления. Представим эти соотношения в дифференциальной и интегральной форме

$$dM = \left(\sum_{i(+)=1}^m G_{(+)\ 2i} - \sum_{i(-)=1}^{n-m} G_{(-)\ 2i} \right) d\tau; \quad (28)$$

$$M = \frac{V p_p}{RT_p}. \quad (29)$$

Причем в различные моменты времени величина M будет различной. Из равенств (28) и (29) получаем дифференциальное уравнение, связывающее p_p и τ

$$dp_p = \frac{RT_p}{V} \left(\sum_{i(+)=1}^m G_{(+)\ 2i} - \sum_{i(-)=1}^{n-m} G_{(-)\ 2i} \right) d\tau.$$

Разделяя переменные, получаем интегральное уравнение для определения времени изменения давления от $p_{1p,y}$ до p_{pk} :

$$\tau_{п} = \frac{V}{RT_p} \int_{p_{1p,y}}^{p_{pk}} \frac{dp_p}{\sum_{i(+)=1}^m G_{(+)\ 2i} - \sum_{i(-)=1}^{n-m} G_{(-)\ 2i}}. \quad (30)$$

Суммарное время изменения давления от $p_{1p,y}$ до p_{pk} определится как сумма

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{ан} + \tau_{п}.$$

При численном интегрировании выражения (30) не следует задавать $p_{p,k} = p_{2p,y}$, так как в этом случае знаменатель обращается в нуль, т. е.

$$\sum_{i(+)=1}^m G_{(+)\ 2i} - \sum_{i(-)=1}^{n-m} G_{(-)\ 2i} = 0.$$

Поэтому для определения p_{pk} следует пользоваться вспомогательной формулой

$$p_{pk} = p_{1p,y} + \xi_k (p_{2p,y} - p_{1p,y}), \quad (31)$$

где коэффициент ξ_k задается в диапазоне значений $0 \leq \xi_k < 1$ в соответствии с допустимой погрешностью определения p_{pk} .

Величины $p_{1p,y}$ и $p_{2p,y}$ для (30) и (31) определяются по вышеописанному алгоритму для установившегося режима.

Для практических целей не имеет смысла стремиться к получению $p_{pk} = p_{2p,y}$ по следующим основным соображениям.

Во-первых, вследствие неизбежных погрешностей при передаче сигнала от датчиков к органам управления нет необходимости в точном достижении давления в ресивере, равного $p_{2p,y}$. Во-вторых, состояние потока перед датчиками вследствие турбулентности не является неизменным во время переходного процесса в ре-

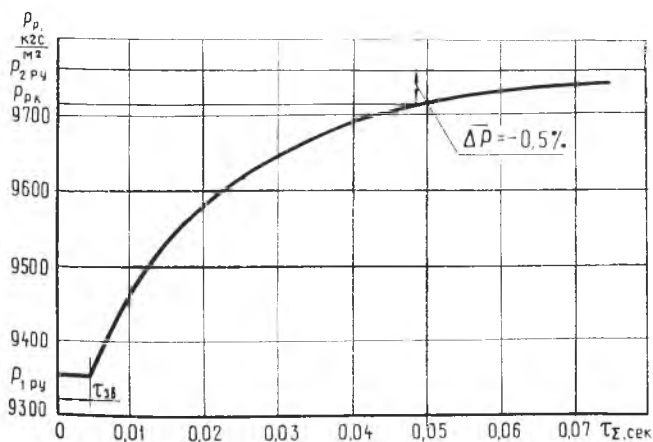


Рис. 3. Изменение давления в ресивере на переходных режимах

сивере. В третьих, как показывает расчетный анализ, выполненный для характерных размеров, время прохождения значительной доли диапазона давлений от $p_{1р.у}$ до $p_{2р.у}$ (95—99%) составляет сотые доли секунды, что для рассматриваемой задачи является, с одной стороны, малой величиной и, с другой стороны, вполне удовлетворительным результатом.

На рис. 3 изображен график изменения давления в ресивере на переходных режимах. Эта зависимость рассчитана для следующих исходных величин:

$$V = 0,785 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; d_i = 0,005 \text{ м}; l_i = 1,5 \text{ м};$$

$$\sum_{q(+)=1}^2 \xi_{(+)} q_i = 2; \sum_{q(-)=1}^2 \zeta_{(-)} q_i = 1,5; n = 7.$$

Из рис. 3 видно, что если считать достаточным для командного давления $p_{р.к}$ значение давления в ресивере p_p , отличающееся от

Номер датчика	T_i^* , °K	p_{1i}^* , $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$	p_{2i}^* , $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$
1	288	10330	10330
2	288	10100	10100
3	288	9000	9500
4	288	8000	9700
5	288	8800	9500
6	288	9300	9300
7	288	9700	9900

давления $p_{2p.y}$ на $\Delta p = \frac{p_{p.k} - p_{2p.y}}{p_{2p.y}} \cdot 100\% = 0,5\%$, то переходный процесс длится всего лишь 0.05 сек.

Полученные соотношения для определения параметров системы на установившихся и переходных режимах дают возможность составить программу расчета на ЭВМ, что, естественно, позволит рассчитать большое число вариантов для определения оптимального сочетания параметров и основных размеров системы. Такая программа была составлена для ЭВМ М-220. Расчетный анализ, выполненный с использованием расчетов по этой программе, показал, что переходный процесс в рассматриваемой системе протекает достаточно быстро.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя, М., «Наука», 1969.
2. Краснощекоев Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. Госэнергоиздат, М.-Л., 1963.
3. Идельчик И. Е. Гидравлические сопротивления. М.-Л., Госэнергоиздат, 1954.

В. В. Токарев

ЗАВИСИМОСТЬ ДИАПАЗОНА УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА, ПОДАВАЕМОГО В ЗОНУ РЕЦИРКУЛЯЦИИ, ОТ ФОРМЫ СТАБИЛИЗАТОРА ПЛАМЕНИ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- β — угол раскрытия стабилизатора;
- V — скорость воздуха перед стабилизатором;
- $V_{сст}$ — скорость воздуха на кромке стабилизатора;
- b — ширина основания стабилизатора;
- H — высота канала камеры;
- G_b — расход воздуха через камеру;
- $G_{в.р}$ — расход воздуха через зону рециркуляции;
- $G = \frac{G_{в.р}}{G_b}$ — относительный расход воздуха через зону рециркуляции;
- $\frac{G_T}{b}$ — расход топлива;
- $\varepsilon = \frac{H}{H}$ — степень загромождения стабилизатором канала камеры;
- $\alpha = \frac{G_a \cdot \varepsilon}{G_T \cdot L_0}$ — коэффициент избытка воздуха;
- L_0 — стехиометрический коэффициент;
- C_x — коэффициент сопротивления стабилизатора;
- τ_n — время пребывания вещества в зоне рециркуляции.