

УДК 621.454

А.М. ТЕРЕШИН, А.Ф. ЧЕВАГИН

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия***ТОРМОЖЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В ПСЕВДОСКАЧКЕ, КОНЦЕПЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА**

Работа посвящена исследованию газодинамических процессов, происходящих в проточном тракте двигателей, применяемых на высокоскоростных сверхзвуковых летательных аппаратах. В частности, рассматриваются прямооточные воздушно-реактивные двигатели различной, в том числе плоской конфигурации. Одним из важных геометрических параметров, влияющим на характеристики течения в плоском канале, является отношение ширины канала к его высоте. Уменьшение данного отношения путем секционирования канала хотя и снижает продольные размеры области торможения, но приводит к увеличению потерь полного давления и вполне очевидно, что величина данного отношения должна быть ограничена снизу. Ограничение сверху можно получить либо из условия обеспечения приемлемой длины канала с реализацией в нем торможения сверхзвукового потока в псевдоскачке, либо именно из условия реализации течения с торможением в псевдоскачке при максимально возможной относительной ширине. Определение наибольшей относительной ширины плоского канала, при которой еще возможно течение с торможением в псевдоскачке, определение области существования псевдоскачка рассматривается в настоящей работе.

Ключевые слова: *прямоточный воздушно-реактивный двигатель, псевдоскачок, пограничный слой, гидравлический диаметр, проточный тракт, отрыв пограничного слоя.*

Введение

Работа посвящена исследованию газодинамических процессов, происходящих в проточном тракте двигателей, применяемых на высокоскоростных сверхзвуковых летательных аппаратах. В частности, рассматриваются прямооточные воздушно-реактивные двигатели различной конфигурации.

Условие интеграции силовой установки с планером летательного аппарата (ЛА) для больших сверхзвуковых скоростей полета накладывает требование применения двигателей плоской конфигурации, расположенных на поверхности корпуса ЛА или его крыльев. Это подразумевает использовать в двигателях плоские прямоугольные или близкие к ним проточные тракты.

Одним из важных геометрических параметров, влияющим на характеристики течения в плоском канале, является отношение ширины канала к его высоте $\bar{b} = b/h$ [1, 2]. Уменьшение \bar{b} путем секционирования канала хотя и снижает продольные размеры области торможения [1], но это приводит к увеличению потерь полного давления [2] и вполне очевидно, что величина \bar{b} должна быть ограничена снизу, т.е. $\bar{b} \geq \bar{b}_{\min}$. Ограничение сверху можно получить либо из условия обеспечения приемлемой длины канала с реализацией в нем торможения

сверхзвукового потока в псевдоскачке, либо именно из условия реализации течения с торможением в псевдоскачке при максимально возможной относительной ширине \bar{b}_{\max} .

Определение наибольшей относительной ширины плоского канала, при которой еще возможно течение с торможением в псевдоскачке, рассматривается в настоящей работе.

Результаты исследований

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, торможение сверхзвукового потока в плоских каналах с $\bar{b} > 1$ происходит с образованием в головной части значительных зон отрыва потока у меньших стенок. Это хорошо иллюстрируется на рис. 1, где представлена картина течения с торможением в плоском канале с относительной величиной $\bar{b} = 6$ для чисел Маха $M_H = 2$ и $3,5$ (высота канала $h = 10$ мм, ширина $b = 60$ мм).

Полученные распределения статического давления по длине канала показывают, что для $M_H = 2$ торможение происходит в псевдоскачке, а в случае $M_H = 3,5$ течение существенно неравномерное с явно выраженным «плато» давления в начальном участке области торможения около одной из боковых стенок. Кроме того, в этом случае наблюдаются ло-

кальные области с сомкнувшимися оторвавшимися пограничными слоями от противоположных широких стенок, т.е. в этом случае торможение потока происходит не в псевдоскачке, а в некоем отрывном течении.

Подобные результаты можно также видеть в работе [3].

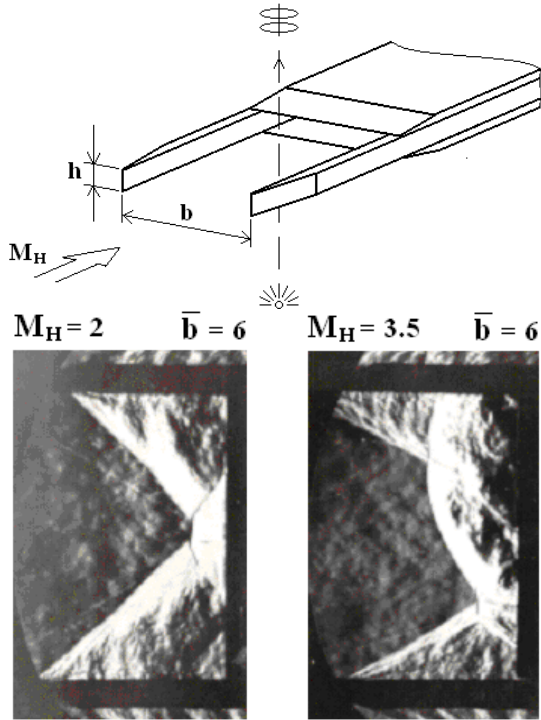


Рис. 1. Торможение сверхзвукового потока на входе плоского канала

Используя условие симметричности для псевдоскачка, можно установить связь между шириной канала и основными геометрическими характеристиками отрывного течения на меньших стенках на начальном участке торможения (рис. 2):

$$\frac{b}{\delta^*} = 2 \cdot \frac{\text{ctg}(\delta_{\text{отр}}) + \text{ctg}(\varepsilon_2)}{\text{ctg}(\varepsilon_1) + \text{ctg}(\varepsilon_2)} \cdot \frac{h_{\text{отр}}}{\delta^*} \quad (1)$$

Здесь δ^* – толщина вытеснения пограничного слоя перед зоной отрыва.

Углы наклона косых скачков уплотнения ε_1 и ε_2 и угол отрыва потока $\delta_{\text{отр}}$ определяются в зависимости от числа M_H набегающего потока и состояния пограничного слоя перед зоной отрыва. В частности, величина $\delta_{\text{отр}}$ (а по ней уже и $\varepsilon_1, \varepsilon_2$) для заданного M_H и числа Re_x может быть определена, например, из известных зависимостей $\delta_{\text{отр}} = f(M, Re_x)$ работы [4].

Углы наклона косых скачков уплотнения ε_1 и ε_2 и угол отрыва потока $\delta_{\text{отр}}$ определяются в зависимости от числа M_H набегающего потока и состояния пограничного слоя перед зоной отрыва.

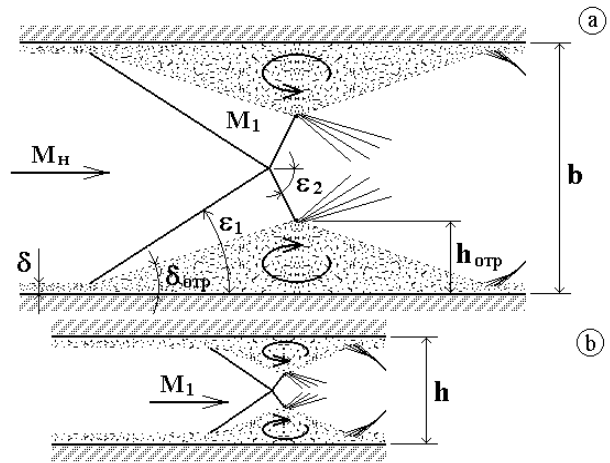


Рис. 2. Торможение потока в головной части псевдоскачка на узких (а) и широких (б) стенках плоского канала

В частности, величина $\delta_{\text{отр}}$ (а по ней уже и $\varepsilon_1, \varepsilon_2$) для заданного M_H и числа Re_x может быть определена, например, из известных зависимостей

$$\delta_{\text{отр}} = f(M, Re_x)$$

работы [4].

В работах [3, 5, 6] показано, что максимальная высота каждой из зон отрыва $h_{\text{отр}}$ на меньших стенках, генерируемых падающими косыми скачками в головной части псевдоскачка (см. рис.2-а), не больше высоты канала h . Исходя из этого, для относительной ширины канала по двумерному расчету, используя зависимость (1), можно получить выражение:

$$\bar{b} = \frac{b}{h} = 2 \cdot \frac{\text{ctg}(\delta_{\text{отр}}) + \text{ctg}(\varepsilon_2)}{\text{ctg}(\varepsilon_1) + \text{ctg}(\varepsilon_2)} = f(M_H) \quad (2)$$

На рис. 3 график зависимости (2) $\bar{b} = f(M_H)$ представлен штриховой линией.

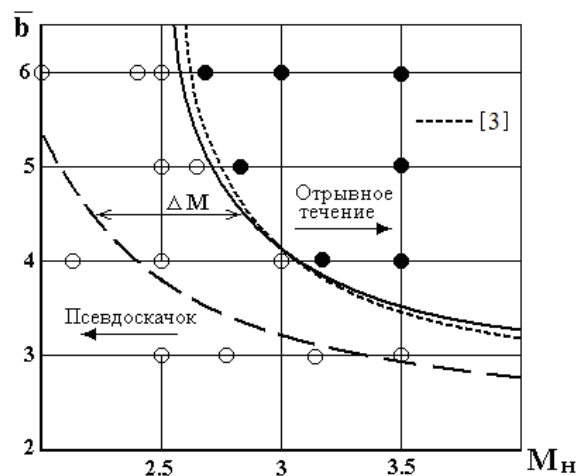


Рис. 3. Области реализации псевдоскачка и отрывного течения для плоских каналов

Теперь следует отметить, что зависимость (2) получена из условия двумерности течения в начальной части псевдоскачка. На самом деле отрывное течение реализуется не только в плоскости параллельной наибольшей стороне канала b , но и в перпендикулярной ей плоскости. Схема течения в этой плоскости представлена на рис. 2 б. Как показано в работах [5, 6], при этом параметры отрывных зон в этой плоскости определяются не числом M_H , а числами M_1 за косыми скачками от зон отрыва на меньших стенках канала – см. рис. 2 а.

В связи с этим предлагается двумерная расчетная схема, представленная на рис. 4. Набегающий поток с числом M_H тормозится в косом скачке уплотнения, соответствующем углу отрыва пограничного слоя $\delta_{отр}$ для M_H ($\delta_{отр}$ определяется, например, по данным работы [4]), и далее для числа M_H^1 за этим скачком производится определение \bar{b} по выражению (2).

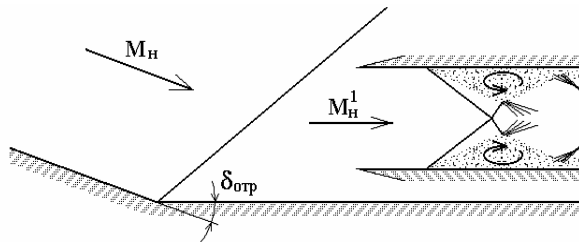


Рис. 4. Расчетная схема течения

Таким образом, по предлагаемой схеме можно рассчитать максимальные значения относительной ширины плоского канала \bar{b} (когда еще реализуется торможение потока в симметричном псевдоскачке), но уже с поправкой на трехмерность течения, которая выражается поправкой по числу M_H набегающего потока ΔM . Расчет \bar{b} с поправкой на ΔM на рис. 3 представлен сплошной линией. Экспериментальные данные, полученные автором для плоских каналов с $\bar{b} = 3, 4, 5, 6$ и диапазона чисел $M_H = 2 \dots 3,5$ также представлены на этом рисунке: светлые значки – поток тормозится с реализацией симметричного псевдоскачка, темные – торможение потока в несимметричном отрывном течении. Пунктирной линией представлена экспериментальная кривая, полученная позднее в своих исследованиях В.И. Пензиным [3] (ЦАГИ).

Сравнение полученной теоретической зависимости $\bar{b} = f(M_H)$ с экспериментальными данными показывает их сходимость, что подтверждает достоверность и правильность проведенных рассуждений, выкладок и принятых допущений при выводе этой зависимости.

В работах В.И. Пензина [2, 3] экспериментально показано, что если известен режим течения торможения сверхзвукового потока в канале (торможение или в псевдоскачке, или в отрывном течении – см. рис. 1, 3), то длину области восстановления давления в псевдоскачке можно оценить, используя концепцию гидравлического диаметра, определяемого как отношение учетверенной площади поперечного сечения канала к его периметру $d_f = 4 \cdot F / U$. (под концепцией имеется ввиду возможность получения линейной зависимости абсолютной длины области торможения $L_{ПС}$ от величины гидравлического диаметра d_f с коэффициентом пропорциональности, зависящим от параметров набегающего потока)

Этот экспериментально полученный факт был получен автором (А.М. Терешин) представляемой работы теоретическим путем.

Запишем для средних параметров уравнение количества движения сжимаемого потока, движущегося с торможением при наличии трения в канале постоянного сечения:

$$F \cdot \frac{d}{dx} (\rho \cdot u^2 + P) = -U \cdot \tau_w.$$

Здесь: F – площадь поперечного сечения канала;

U – периметр канала;

ρ, u, P – плотность, скорость и статическое давление потока;

τ_w – касательное напряжение на стенке.

Вводя газодинамическую функцию $z(\lambda)$, безразмерный коэффициент трения C_f и безразмерную температуру торможения $\Theta = T_0 / T_w$ (T_0 – температура торможения потока, T_w – температура стенки), получим:

$$\frac{k+1}{2k} \cdot \frac{d}{dx} [\sqrt{\Theta} \cdot z(\lambda)] = -\frac{U}{F} \cdot \frac{C_f}{2} \cdot \sqrt{\Theta} \cdot \lambda,$$

или

$$dx = -\frac{F}{U} \cdot \frac{k+1}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Theta} \cdot C_f \cdot \lambda} \cdot d[\sqrt{\Theta} \cdot z(\lambda)]. \quad (3)$$

Это выражение интегрируется в осредненных параметрах с привлечением уравнений энергии и неразрывности в диапазонах изменения осредненной приведенной скорости λ либо $1 \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$, либо $1 \geq \lambda \geq 0$ [7]. В случае применения выражения (3) для описания процессов в псевдоскачке, параметры в его правой части Θ и C_f должны быть функционально выражены через λ и тогда интеграл этой части будет выражать длину области торможения, а при определенных пределах интегрирования λ_1 и

λ_2 , удовлетворяющих условиям псевдоскачка – его длину $L_{ПС}$. Тогда, вынося постоянное отношение F/U за пределы интегрирования, получим:

$$L_{ПС} = x_2 - x_1 = \int_{x_1}^{x_2} dx = -\frac{F}{U} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{k+1}{k} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\Theta} \cdot C_f \cdot \lambda} \cdot d[\sqrt{\Theta} \cdot z(\lambda)].$$

Отмечая, что $4F/U$ – суть гидравлический диаметр d_Γ , и обозначая интеграл в правой части через $f(M)$, окончательно получим:

$$L_{ПС} = -d_\Gamma \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{k+1}{4k} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\Theta} \cdot C_f \cdot \lambda} \cdot d[\sqrt{\Theta} \cdot z(\lambda)] = d_\Gamma \cdot f(M). \quad (4)$$

Полученное выражение представляет собой линейную зависимость длины псевдоскачка от величины гидравлического диаметра с коэффициентом пропорциональности, зависящим от параметров набегающего потока. И, значит, соблюдается концепция гидравлического диаметра.

Рассматривая течение в прямоугольных каналах, выразим выражение (4) в относительных линейных величинах, разделив левую и правую части выражения на высоту канала h .

Обозначая $L_{ПС} / h = \bar{L}_{ПС}$ и $d_\Gamma / h = \bar{d}_\Gamma$, будем иметь:

$$\bar{L}_{ПС} = \bar{d}_\Gamma \cdot f(M).$$

Для случая $\bar{d}_\Gamma = 1$ (канал квадратного или круглого сечения) относительная длина псевдоскачка $\bar{L}_{ПС,0}$ соответствует интегралу, стоящему в правой части (4), то есть:

$$\bar{L}_{ПС,0} = - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{k+1}{4k} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\Theta} \cdot C_f \cdot \lambda} \cdot d[\sqrt{\Theta} \cdot z(\lambda)]. \quad (5)$$

Выражение (5) определяет в общем виде относительную длину псевдоскачка в канале постоянного сечения с наименьшим значением диаметра $\bar{d}_\Gamma = 1$.

Для канала прямоугольного сечения со сторонами b и h величина относительного гидравлического диаметра имеет вид:

$$\bar{d}_\Gamma = \frac{d_\Gamma}{h} = \frac{4b \cdot h}{2(b+h) \cdot h} = \frac{2\bar{b}}{\bar{b}+1}.$$

Тогда, для плоского канала зависимость (4) в относительных величинах принимает вид:

$$\bar{L}_{ПС} = \frac{2\bar{b}}{\bar{b}+1} \cdot \bar{L}_{ПС,0}. \quad (6)$$

Полученные зависимости (4), (5), (6) в общем виде полностью определяют линейные размеры области торможения в псевдоскачке в плоских и квадратных (круглых) каналах.

Зависимость $\bar{L}_{ПС,0} = f(M)$ для каналов квадратного или круглого сечения может быть использована по данным многих исследователей (см., например, работы [8 – 12]). На рис. 5 представлены зависимости $\bar{L}_{ПС,0} = f(M)$, полученные в отмеченных работах.

Как видно из рисунка, разброс по величине относительной длины псевдоскачка составляет до ~ 2-х калибров. Это объясняется, по-видимому, различным подходом у исследователей определения начала и конца псевдоскачка. К примеру, конец псевдоскачка можно определять либо по величине статического давления (достижение P_{max}), либо по величине относительной скорости потока λ (соответствие скорости потока скорости за прямым скачком).

На графике рис. 6 приведены расчетные значения относительной длины псевдоскачка

$$\bar{L}_{ПС} = L_{ПС} / h$$

в плоском канале в зависимости от M_H и \bar{b} .

Расчет произведен по формуле (6), где в качестве начальной длины $\bar{L}_{ПС,0}$ для $\bar{b} = 1$ используется выражение из работы [8]:

$$\bar{L}_{ПС,0} = 2 \cdot \frac{k+1}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{1}{M_H^2} \right).$$

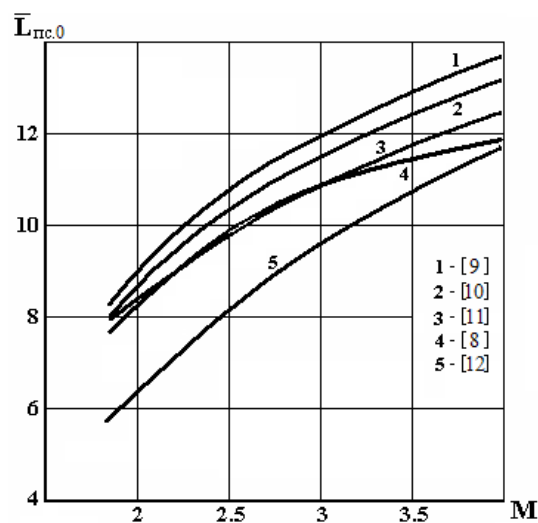


Рис. 5. Длина псевдоскачка для каналов квадратного или круглого сечения

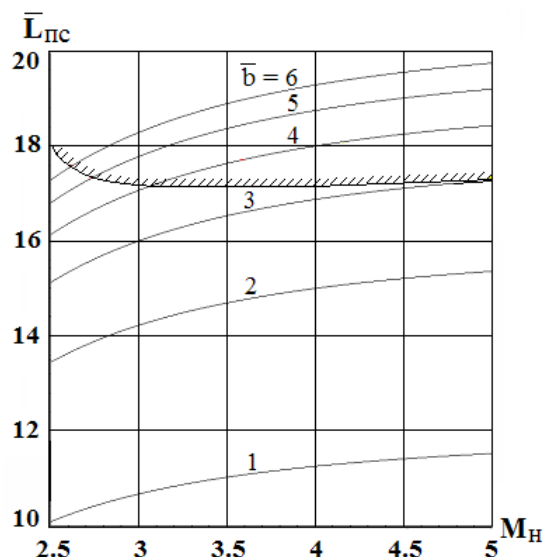


Рис. 6. Длина псевдоскачка в зависимости от числа M_H и относительной ширины плоского канала

На этом же графике (с использованием графика на рис. 3) отмечена граница, соответствующая максимальным значениям \bar{L}_{\max} , при которых еще реализуется псевдоскачок.

График наглядно иллюстрирует, как можно еще на этапе предварительного проектирования определять необходимые наибольшие значения относительной ширины канала предкамерного диффузора при реализации в нем торможения потока в псевдоскачке.

Выводы

Таким образом, расчетным путем определены:

- граница области существования в плоских каналах торможения сверхзвукового потока в псевдоскачке и отрывном несимметричном течении;

- подтверждена концепция гидравлического диаметра, заключающаяся в получение линейной зависимости абсолютной длины области торможения в псевдоскачке от величины гидравлического диаметра с коэффициентом пропорциональности, зависящим от параметров набегающего потока.

Полученные теоретические зависимости подтверждены экспериментально.

Поступила в редакцию 17.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, главный научный сотрудник А.К. Трифонов, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский, Россия.

Литература

1. Newmann, E.P. Supersonic diffusers for wind tunnels [Text] / E.P. Newmann, F. Lustwerk // *Journal of Applied Mechanics*. – 1949. – Vol. 16, № 2. – P. 17 – 22.
2. Пензин, В.И. Влияние формы поперечного сечения прямоугольного канала на торможение сверхзвукового потока [Текст] / В.И. Пензин // *Ученые записки ЦАГИ*. – 1988. – Т. 19, № 3. – С. 45 – 52.
3. Пензин, В.И. Псевдоскачок и отрывное течение в прямоугольных каналах [Текст] / В.И. Пензин // *Ученые записки ЦАГИ*. – 1988. – Т. 19, № 1. – С. 7 – 23.
4. Erdos, J. Shock-boundary layer interaction and flow separations [Text] / J. Erdos, A. Pallone // *Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics institute. Washington, 1962. – Stanford: Calif. Univ. Press., 1962. – P. 239 – 254.*
5. Терешин, А.М. К вопросу о существовании течения в псевдоскачке в прямоугольных каналах [Текст] / А.М. Терешин // *Тр. 10 Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей Ф.А.Цандера: Секция Теория двигателей летательных аппаратов. – Рига, 1987. – С. 40 – 52.*
6. Терешин, А.М. К вопросу о длине псевдоскачка [Текст] / А.М. Терешин // *Тр. 12 научн. чтений, посвященных памяти выдающихся советских ученых – пионеров освоения космического пространства: Секция Двигатели летательных аппаратов. – М., 1988. – С. 7 – 24.*
7. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика [Текст] / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 320 с.
8. Зимонт, В.Л. Расчет псевдоскачка в цилиндрическом канале [Текст] / В.Л. Зимонт, В.Н. Острась // *Ученые записки ЦАГИ*. – 1974. – Т. 5, № 3. – С. 19-29.
9. Navweps. Handbook of supersonic aerodynamics [Text] / Navweps. – 1959. – Vol. 6, № 17. – P. 271.
10. Iku, T. The mechanism of pseudoshock waves [Text] / T. Iku, K. Matsuo, M. Nagai // *Bull. of JSME*. – 1974. – Vol. 17, № 108. – P. 731 – 739.
11. Крокко, Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений [Текст] / Л. Крокко // В кн. *Основы газовой динамики / под ред. Г.М. Эммонса. – М.: Изд-во. Инстр. лит., 1963. – 286 с.*
12. Острась, В.Н. Экспериментальное исследование силы трения в цилиндрическом канале при наличии псевдоскачка [Текст] / В.Н. Острась, В.И. Пензин // *Ученые записки ЦАГИ*. – 1974. – Т. 5, № 2. – С. 9 – 24.

ГАЛЬМУВАННЯ НАДЗВУКОВОГО ПОТОКУ У ПСЕВДОСТРИБКУ, КОНЦЕПЦІЯ ГИДРАВЛІЧНОГО ДІАМЕТРУ

О.М. Терешин, О.Ф. Чевагин

Робота присвячена дослідженню газодинамічних процесів, які відбуваються у проточній частині двигунів, які застосовуються на високошвидкісних надзвукових літальних апаратах. Саме, розглядаються прямоочні повітряно-реактивні двигуни різної, у тому числі плоскої конфігурації. Одним з важливих геометричних параметрів, що впливають на характеристики течії в плоскому каналі, є відношення ширини каналу до його висоти. Зменшення даного відношення шляхом секціонування каналу хоч й знижує поздовжні розміри області гальмування, але призводить до збільшення втрат повного тиску і вочевидь, величина даного відношення повинна бути обмежена знизу. Обмеження зверху можна отримати або з умови забезпечення прийнятної довжини каналу з реалізацією у ньому гальмування надзвукового потоку в псевдострибку, або саме з умови реалізації течії з гальмуванням в псевдострибку при максимально можливій відносній ширині. Визначення найбільшої відносної ширини плоского каналу, за якої ще можлива течія з гальмуванням у псевдострибку, визначення області існування псевдострибку розглядається у цій роботі.

Ключові слова: прямоочний повітряно-реактивний двигун, псевдострибок, пограничний шар, гідравлічний діаметр, проточний тракт, відрив пограничного шару.

DECELERATION OF SUPERSONIC FLOW IN PSEUDOSHOCK, HYDRAULIC DIAMETER CONCEPT

A.M. Tereshin, A.F. Chevagin

Work is devoted to research gasdynamic the processes occurring in a flowing path of engines, applied on high-speed supersonic flying devices. In particular, direct-flow propulsion jet engines various, including a flat configuration are considered. One of the important geometrical parameters, characteristics of current in the flat channel, the attitude of width of the channel to its height is influencing. Reduction of this size by sectioning the channel though reduces the longitudinal sizes of area of braking, but leads to increase in losses of full pressure and it is quite obvious, that this size should be limited from below. Restriction from above can be received or from a condition of maintenance of comprehensible length of the channel with realization in it braking of a supersonic stream in pseudochock, or from a condition of realization of current with braking in pseudochock at the greatest possible relative width of the channel. Definition of the greatest relative width of the flat channel at which current with braking in pseudochock is still possible, definition of area of existence of pseudochock is considered in the present work.

Key words: ramjet engine, pseudochock, boundary layer, hydraulic diameter, ramjet duct, boundary layer separation.

Терешин Александр Михайлович – д-р техн. наук, член-корр. Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, вед. научный сотрудник, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский, Россия.

Чевагин Александр Федорович – канд. техн. наук, член-корр. Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, начальник отделения, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), Жуковский, Россия.