

УДК 536.24:533

**Фиалко Н.М.^{1,2}, Прокопов В.Г.¹, Алёшко С.А.¹, Полозенко Н.П.¹, Тимощенко А.Б.¹,
Абдулин М.З.^{1,2}, Малецкая О.Е.¹, Ночовный А.В.²**¹ *Институт технической теплофизики НАН Украины*² *Национальный технический университет Украины «КПИ»***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НИШЕВОЙ ПОЛОСТИ
НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАНАЛА**

Наводяться дані числових досліджень картини обтікання ніш трапецієподібної форми і прямокутних нішевих порожнин з округленими кромками. Представлено результати аналізу закономірностей впливу на аеродинамічний опір ніші кутів нахилу її передньої і задньої стінок, а також радіусів заокруглення кромки цих стінок.

Приводятся данные численных исследований картины обтекания ниш трапециевидной формы и прямоугольных нишевых полостей со скругленными кромками. Представлены результаты анализа закономерностей влияния на аэродинамическое сопротивление ниши углов наклона ее передней и задней стенок, а также радиусов скругления кромки этих стенок.

The numerical research data of flow patterns in trapezoidal and rectangular niches with rounded edges of the cavities are presented. The results of analysis of the influence of slope of front and back niche walls on niche aerodynamic resistance and the curvature radii of the edges of these walls are given.

 H, L – длина и высота ниши; h – высота канала; k – кинетическая энергия турбулентности; P – статическое давление; R_1, R_2 – радиусы скругления кромок передней и задней стенок ниши; Tu – интенсивность турбулентности на входе в канал; u, v – продольная и поперечная компоненты скорости соответственно; W_{cp} – средняя скорость на входе в канал; x, y – продольная и поперечная координаты соответственно; β_1, β_2 – углы наклона передней и задней стенок ниши; $\Delta P_0, \Delta P$ – разность статических давлений перед нишевой полостью и за ней для прямоугольной и непрямоугольной ниш; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; μ, ν – динамическая и кинематическая вязкости; μ_T – турбулентная динамическая вязкость; ρ – плотность; $\xi_0 = (2\Delta P_0)/\rho W_{cp}^2, \xi = (2\Delta P)/\rho W_{cp}^2$ – коэффициенты местного сопротивления прямоугольной и непрямоугольной ниши; $Re = (2W_{cp} \cdot h)/\nu$ – число Рейнольдса.

В горелочных устройствах струйно-нишевого типа наличие нишевых полостей является, как известно, одним из важных факторов стабилизации процесса горения благодаря образованию в них устойчивых вихревых структур [1-3]. И поскольку такие полости представляют собой дополнительные аэродинамические сопротивления, то, очевидно, актуальным является проведение исследований, ориентированных на изучение возможности снижения сопротивления, создаваемого собственно нишей, за счет изменения ее конфигурации.

Исследования, проведенные К. Грайхеном и В.И. Корниловым, свидетельствуют о том,

что в случае прямоугольной ниши ее аэродинамическое сопротивление обуславливается главным образом эффектом присоединения внешнего потока к задней стенке ниши [4]. Ввиду этого представляется целесообразным такое варьирование конфигурации нишевой полости, при котором изменяется угол наклона ее задней стенки или сглаживается острая кромка этой стенки за счет скругления ее угла. В плане анализа возможностей снижения аэродинамического сопротивления ниши следует, по-видимому, рассмотреть также соответствующие изменения геометрии и для ее передней стенки (рис. 1).

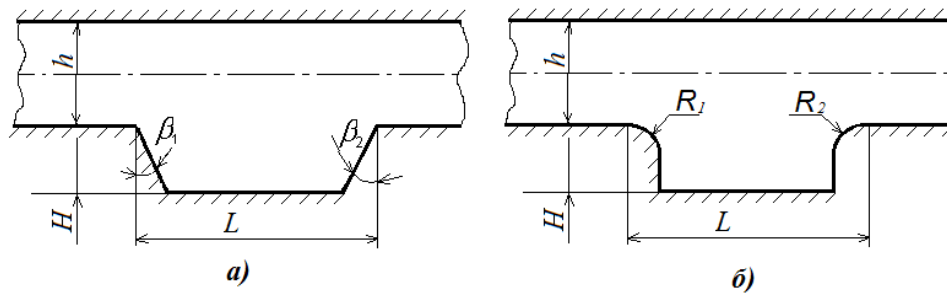


Рис. 1. К постановке задачи: а) трапецевидная ниша с острыми кромками; б) прямоугольная ниша со скругленными кромками.

Таким образом, исследованию подлежат закономерности влияния на аэродинамическое сопротивление нишевой полости таких ее геометрических характеристик, как углы наклона β_1 и β_2 передней и задней стенок ниши и радиусы R_1 и R_2 дуг скругления ее угловых зон.

Исследования проводились на основе математического моделирования рассматриваемой физической ситуации. Задача обтекания нишевой полости решалась в двумерной постановке с использованием уравнений турбулентного переноса количества движения и неразрывности

$$\rho \left(\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

При этом профиль скорости во входном сечении предвключенного участка полагался равномерным, а в выходном сечении канала задавались мягкие граничные условия. На стенках канала и нишевой полости выполнялись условия прилипания. Для замыкания системы уравнений (1) – (3) использовалась k- ϵ – модель турбулентности в модификации RNG.

Проведение вычислительных эксперимен-

тов основывалось на применении программного пакета FLUENT [5]. Поставленная задача решалась при следующих значениях исходных параметров: $L = 4 \cdot 10^{-2}$ м; $H = 10^{-2}$ м; $h = 8 \cdot 10^{-2}$ м; значения углов β_1 и β_2 изменялись от 0 до 60 град, радиусов R_1 и R_2 – от $2,5 \cdot 10^{-3}$ м до 10^{-2} м; число Re варьировалось в пределах $(21,9 \dots 43,8) \cdot 10^4$. Интенсивность турбулентности потока на входе в канал $Tu = 3$ %.

Характерные результаты выполненных исследований представлены на рис. 2 – 4 и в таблице. В данной таблице приведены значения величины j , представляющей собой отношение коэффициентов местного сопротивления непрямоугольной ξ и прямоугольной ξ_0 ниши. Как видно, увеличение угла наклона β_2 и радиуса R_2 приводит к уменьшению величины j , то есть к снижению аэродинамического сопротивления ниши. Так, $j = 0,98; 0,92$ и $0,8$ при $\beta_2 = 30; 45$ и 60 град соответственно, то есть изменение угла наклона β_2 задней стенки ниши от 0 до 30 градусов несущественно сказывается на величине аэродинамического сопротивления ниши. По мере же дальнейшего возрастания угла β_2 аэродинамическое сопротивление ниши достаточно резко снижается.

Обращает на себя внимание тот факт, что влияние сглаживания вершины угла задней стенки ниши дугой радиуса R_2 оказывается в рассматриваемых условиях более значительным, чем изменения угла наклона этой стенки. Так при $R_2 = 10^{-2}$ м, аэродинамическое сопротивление ниши снижается на 27 % по сравнению с прямоугольной нишей, а при $\beta_2 = 60$ град это снижение составляет лишь 20 %.

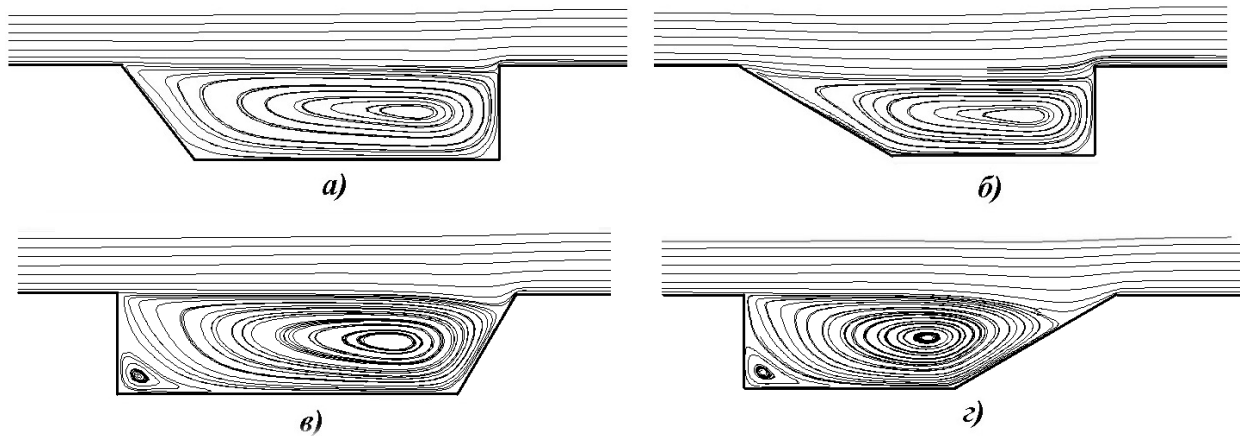


Рис. 2. Линии тока при $Re = 21,9 \cdot 10^4$ для различных значений угла наклона передней β_1 и задней β_2 стенок ниши: а) $\beta_1 = 30$ град; $\beta_2 = 0$; б) $\beta_1 = 60$ град; $\beta_2 = 0$; в) $\beta_1 = 0$; $\beta_2 = 30$ град; г) $\beta_1 = 0$; $\beta_2 = 60$ град.

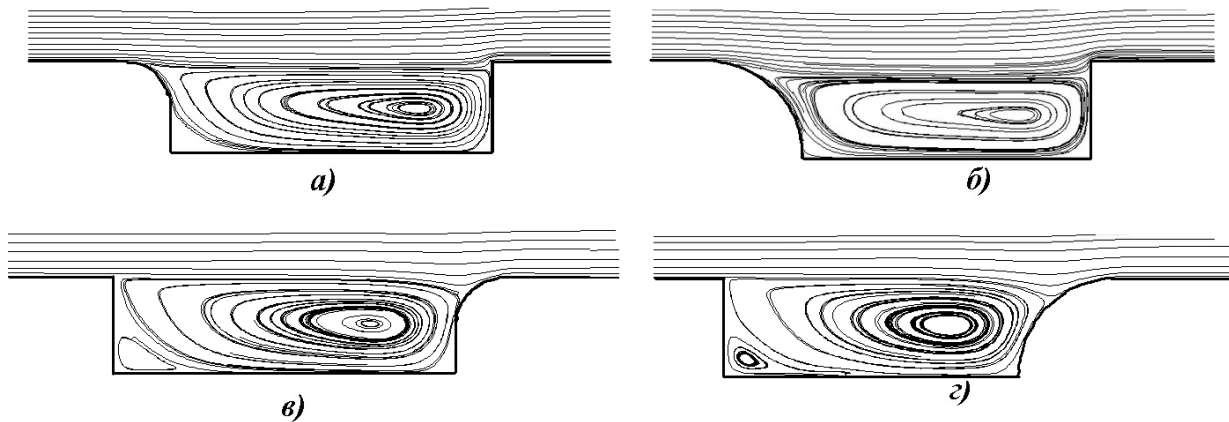


Рис. 3. Линии тока при $Re = 21,9 \cdot 10^4$ для различных значений радиусов скругления кромок передней R_1 и задней R_2 стенок ниши: а) $R_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 0$; б) $R_1 = 10^{-2}$ м; $R_2 = 0$; в) $R_1 = 0$; $R_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м; г) $R_1 = 0$; $R_2 = 10^{-2}$ м.

Что же касается передней стенки ниши, то здесь имеет место противоположная картина. То есть увеличение радиуса R_1 и угла наклона стенки β_1 приводит не к уменьшению, а к увеличению аэродинамического сопротивления нишевой полости. Причем сглаживание вершины угла оказывает менее существенное влияние на коэффициент сопротивления j , чем изменение угла наклона передней стенки.

Картину линий тока для ниш различной формы при $Re = 21,9 \cdot 10^4$ иллюстрируют рисунки 2 и 3. Как видно из рисунков, чем больше значение угла β_2 и радиуса R_2 , тем меньшая доля основного потока попадает в нишу. Это

обстоятельство является одним из существенных факторов, определяющих снижение аэродинамического сопротивления ниши.

Относительно же влияния параметров β_1 и R_1 на вихревую динамику течения в нише, то здесь важнейшей является следующая особенность. Увеличение угла наклона передней стенки β_1 способствует формированию вихревого течения вдоль этой стенки все в большей мере противоположного направлению течения внешнего потока (см. рис. 2, а, б). Это в значительной степени обуславливает возрастание аэродинамического сопротивления ниши при увеличении угла β_1 . Аналогичные соображения

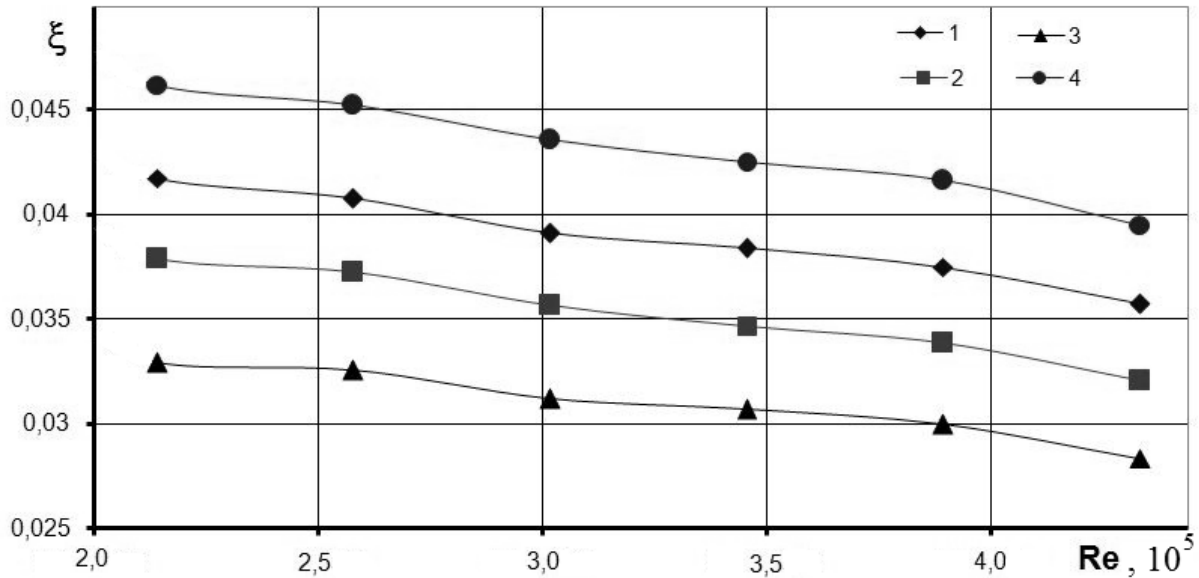


Рис. 4. Зависимость коэффициента местного сопротивления нишевой полости от числа Re : 1 – $\beta_1 = 0$; $\beta_2 = 0$; 2 – $\beta_1 = 0$; $\beta_2 = 45$ град; 3 – $\beta_1 = 0$; $\beta_2 = 60$ град; 4 – $\beta_1 = 60$ град; $\beta_2 = 0$.

Таблица. Отношение j коэффициентов местного сопротивления непрямоугольной и соответствующей прямоугольной ниши при различных значениях углов наклона β_1 и β_2 ее передней и задней стенок и разных величинах радиусов скругления R_1 и R_2 кромок этих стенок для $Re = 21,9 \cdot 10^4$.

параметр	β_1 , град			R_1 , 10^{-3} м			β_2 , град			R_2 , 10^{-3} м		
	30	45	60	2,5	5,0	10,0	30	45	60	2,5	5,0	10,0
величина параметра	1,05	1,06	1,13	1,02	1,02	1,04	0,98	0,92	0,8	0,83	0,82	0,73
j	1,05	1,06	1,13	1,02	1,02	1,04	0,98	0,92	0,8	0,83	0,82	0,73

справедливы и относительно закономерностей влияния величины радиуса R_1 (см. рис. 3, а, б).

Выводы

В работе приведены результаты математического моделирования по изучению закономерностей обтекания нишевых полостей различной конфигурации. При этом:

1. Проведен анализ эффектов влияния на аэродинамическое сопротивление трапециевидной ниши углов наклона ее передней и задней стенок. В частности показано, что увеличение угла наклона передней стенки нишевой полости приводит к некоторому повышению ее аэродинамического сопротивления, при возрастании же угла наклона задней стенки наблюдается снижение данного сопротивления.

2. Выполнены исследования по определению зависимости аэродинамического сопротивления прямоугольной ниши со скругленными кромками от величины радиусов их скругления. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне изменения геометрических параметров нишевой полости:

- с ростом радиуса скругления передней острой кромки ниши наблюдается увеличение аэродинамического сопротивления нишевой полости, причем сглаживание этой кромки в меньшей мере сказывается на величине аэродинамического сопротивления ниши по сравнению с увеличением угла наклона ее передней стенки;
- увеличение радиуса скругления задней острой кромки ниши обуславливает падение ее аэродинамического сопротивления; влияние сгла-

живания угла данной кромки ниши является более значительным, чем изменения угла наклона ее задней стенки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Абдуллин М.З., Полозенко Н.П. Численные исследования картины течения горючего и окислителя в горелочных устройствах струйно-нишевого типа // Мат. XVIII Межд. конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», 10-14 июня 2008, Ялта. – Киев, 2008. – С. 101–104

2. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алёшко С.А. и др. Компьютерное моделирование эффектов влияния скоростных напоров горючего и окислителя на структуру течения в условиях микрофакельного сжигания топлива // Материалы

XVIII Межд. конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», 10-14 июня 2008, Ялта. – Киев, 2008. – С. 109–111.

3. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С. и др. Компьютерное моделирование структуры течения в горелочных устройствах стабилизаторного типа // Мат. 7 Межд. конференции «Проблемы промышленной теплотехники» 23-27 мая 2011, К.: – Пром. теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 7. – С. 50.

4. Грайхен К., Корнилов В.И. Некоторые свойства турбулентного течения в каверне в условиях дозвукового обтекания // Теплофизика и аэромеханика. – 1996. – Т. 3, № 4. – С. 321–335.

5. Choudhury D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling. Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, 1993.

Получено 27.12.2011 г.