



УДК 697.92

**Бройда В.А.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: broida@mail.ru

**Сафиуллин Ф.Ф.** – магистр

E-mail: fanfagsaf@rambler.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Численное исследование аэродинамики цилиндрического тела в канале с диафрагмой**

#### **Аннотация**

На основе численного моделирования определено распределение давления в сечениях осесимметричного течения в канале с перемещаемым цилиндрическим телом и диафрагмой. Рассчитаны коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  и коэффициент  $k$ , характеризующий аэродинамическую силу, воздействующую на цилиндрическое тело. Рассмотрены варианты разных длин цилиндрического тела, плоской и конусной диафрагмы. Результаты исследования могут быть использованы при конструировании и расчете регуляторов расходов, обеспечивающих рациональное использование энергии.

**Ключевые слова:** канал, диафрагма, цилиндрическое тело, давление.

#### **Введение**

Эффективная работа систем вентиляции при изменяющихся условиях существенно зависит от их способности поддерживать заданный расход воздуха. В состав устройства для регулирования потока жидкости или газа обычно входит перемещаемый в канале элемент, часто это золотник клапана. В данной работе исследуется аэродинамика цилиндрического тела, перемещаемого вдоль оси круглого канала с диафрагмой, представляющего собой модель регулирующего устройства. При перемещении цилиндрического тела изменяется картина течения, изменяются поля скоростей и давлений вблизи регулирующего устройства.

Характеристикой падения давления в регулирующем устройстве может служить его коэффициент местного сопротивления  $\zeta$ , который зависит от положения цилиндрического тела относительно диафрагмы.

В некоторых случаях важна величина силы аэродинамического воздействия потока на перемещаемое цилиндрическое тело. Чаще эту силу требуется компенсировать, но иногда она используется для перемещения тела, регулирующего поток. Такое использование этой силы предполагается в автоматических регуляторах прямого действия, например [1, 2, 3 и др.], подобные устройства можно назвать стабилизаторами расхода воздуха.

Обобщенной характеристикой аэродинамической силы воздействия может служить величина  $k$ , равная отношению перепада давления между передней и задней поверхностями цилиндрического тела к динамическому давлению потока.

Целью исследования является определение характеристик  $\zeta$  и  $k$ , в зависимости от положения цилиндрического тела, при нескольких вариантах его длины и формы диафрагмы (плоская диафрагма, коническая диафрагма). Такая информация необходима при конструировании и расчете регулирующих устройств, в частности стабилизаторов расхода вентиляционного воздуха прямого действия.

#### **Основная часть**

Решение поставленной задачи основывается на численном моделировании методом CFD, такой метод успешно применяется для решения целого ряда аэродинамических задач вентиляции [4, 5, 6, 7 и др.].

В ходе численного моделирования рассчитывались поля скоростей и давлений, на основании которых определялись характеристики  $\zeta$  и  $k$ . При решении использовалась стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности.

Верификация выбранной модели решения, включая способ задания граничных условий, приемы сеточной адаптации проводилась сравнением известного опытного значения коэффициента местного сопротивления плоской диафрагмы с результатами численного расчета. Численное решение не должно зависеть от степени измельчения расчетной сетки. В качестве контрольного параметра был выбран, характерный для данной задачи, перепад давления на расчетном участке канала с диафрагмой.

По результатам численного моделирования для канала диаметром 0,16 м, при скорости воздуха 7 м/с, расчетной длине канала 3,35 м с плоской диафрагмой, имеющей отверстие диаметром 0,11 м определены: давления на входе  $P_1=170,59$  Па, на выходе из канала с диафрагмой  $P_2=31,15$  Па, динамическое давление в канале  $P_d=30,01$  Па. Падение давления в таком же канале без диафрагмы составляет  $\Delta P=17,82$  Па. Значение коэффициента местного сопротивления диафрагмы  $\zeta$  рассчитано по формуле:

$$\zeta = (P_1 - P_2 - \Delta P) / P_d, \quad (1)$$

$$\zeta = (170,59 - 31,15 - 17,82) / 30,01 = 4,05.$$

Опытное значение коэффициента местного сопротивления плоской диафрагмы, соответствующее таким же условиям  $\zeta=3,75$  [8], отличие составляет  $\sim 8\%$ , что можно считать неплохим подтверждением выбранной численной модели.

Варианты схем решаемых задач об обтекании цилиндрического тела в круглом канале с диафрагмой показаны на рис. 1.

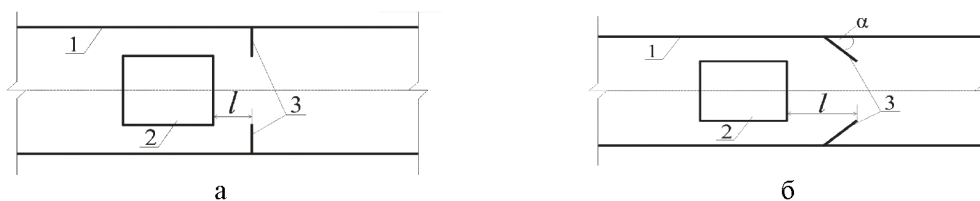


Рис. 1. Схемы решаемых задач:

а – вариант с плоской диафрагмой; б – вариант с конусной диафрагмой;

1 – стенка круглого канала  $d=0,16$  м, 2 – перемещаемое цилиндрическое тело диаметром  $d_m=0,11$  м,

3 – плоская или коническая диафрагма с диаметром отверстия  $d_o=0,11$  м,

$l$  – переменное расстояние от цилиндрического тела до края отверстия диафрагмы

В расчетах рассматривались два варианта длины цилиндрического тела  $l_m=0,10$  м и  $l_m=0,05$  м. Рассматривались диафрагмы с углами конусности  $\alpha=40^\circ$  и  $\alpha=55^\circ$ . Численное исследование проведено при переменных значениях расстояния  $l$  в диапазоне от 0,0048 до 0,05 м.

Характерная расчетная картина течения в виде линий тока показана на рис. 2.



Рис. 2. Расчетная картина течения при условиях:

средняя скорость воздуха в канале 7 м/с, длина цилиндрического тела  $l_m=0,10$  м,

диафрагма с углом конусности  $\alpha=40^\circ$ , расстояние  $l=0,025$  м, число  $Re \approx 66000$

Хорошо заметны области повышенной скорости потока в местах сужения, вихревые зоны за цилиндрическим телом и в пристеночной области после диафрагмы.

В результате расчетов определялись полные давления до цилиндрического тела и после диафрагмы в сечениях 1-1 и 2-2, которые располагаются на достаточном удалении от цилиндрического тела ( $15d$ ) и на расстоянии ( $20d$ ) после диафрагмы, а также давления на передней и задней стенке цилиндра при изменяемом расстоянии  $l$ . Характерные эпюры таких давлений показаны на рис. 3.

На основании расчетных средних давлений в сечениях определялись значения коэффициента местного сопротивления  $\zeta$  по формуле:

$$\zeta = (P_{1-1} - P_{2-2} - \Delta P) / P_0, \quad (2)$$

где  $P_{1-1}$  – среднее значение полного давления в сечении 1-1, Па;

$P_{2-2}$  – среднее значение полного давления в сечении 2-2, Па;

$\Delta P$  – перепад полных давлений в канале на расстоянии между сечениями 1-1 и 2-2 при отсутствии цилиндрического тела и диафрагмы, Па;

$P_0$  – динамическое давление в канале, Па.

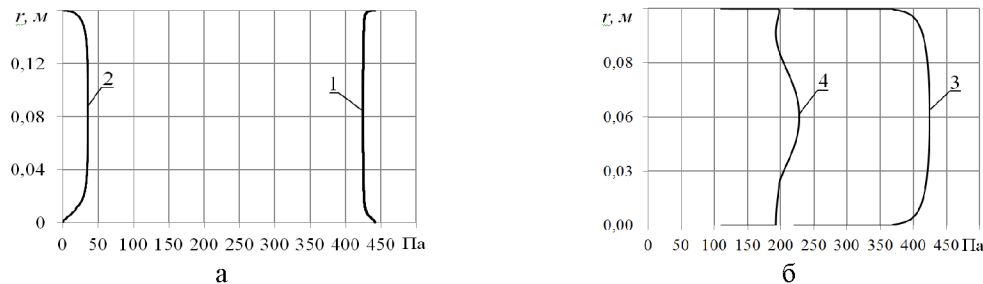


Рис. 3. Эпюры полного давления для варианта длины цилиндрического тела  $l_m=0,10$  м и плоской диафрагмы при  $l=0,05$  м: 1 – в сечении 1-1, 2 – в сечении 2-2, 3 – на передней стенке цилиндрического тела, 4 – на задней стенке цилиндрического тела,  $r$  – поперечная координата

Коэффициент  $k$ , характеризующий аэродинамическую силу, действующую на цилиндрическое тело, рассчитывается по формуле:

$$k = (P_n - P_z) / P_0, \quad (3)$$

где  $P_n$ ,  $P_z$  – средние значения полного давления, соответственно, на передней и задней поверхности цилиндрического тела, Па.

Определенные на основе численного моделирования значения  $\zeta$  и  $k$  в зависимости от относительного размера  $l/d$  для основных расчетных вариантов показаны на рис. 4.

Для всех рассмотренных вариантов сохраняются общие тенденции изменения характеристик  $\zeta$  и  $k$ , с уменьшением  $l/d$  величины  $\zeta$  и  $k$  возрастают.

Величины  $\zeta$  и  $k$  для длинного и укороченного цилиндрического тела достаточно близки, но при этом стабилизирующее устройство с укороченным цилиндром будет значительно меньше, что очень важно для реальной конструкции.

В области значений  $l/d=0,06-0,14$  величины  $\zeta$  и  $k$  для конических диафрагм с углом сужения  $\alpha=40^\circ$  и  $\alpha=55^\circ$  несколько меньше, чем для плоской диафрагмы. Это дает определенное преимущество при применении регуляторов с такими диафрагмами в условиях ограниченного располагаемого давления.

В области значений  $l/d>0,14$  величины  $\zeta$  и  $k$  для всех вариантов практически одинаковы.

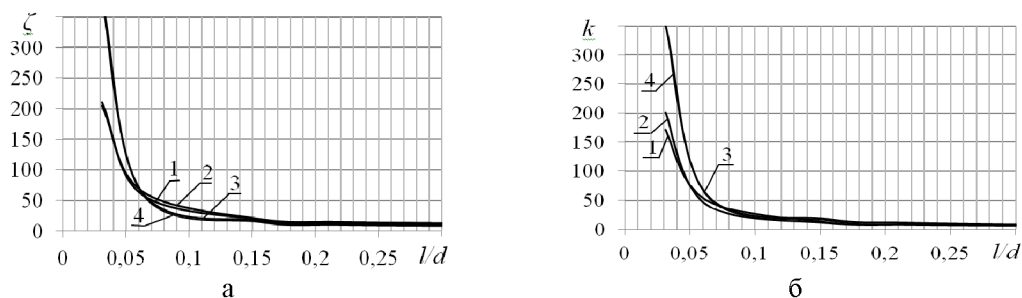


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициентов  $\zeta$  и  $k$  от относительного размера  $l/d$ :

1 – цилиндрическое тело  $l_m=0,10$  м, плоская диафрагма;

2 – цилиндрическое тело  $l_m=0,05$  м, плоская диафрагма;

3 – цилиндрическое тело  $l_m=0,10$  м, коническая диафрагма  $\alpha=40^\circ$ ;

4 – цилиндрическое тело  $l_m=0,10$  м, коническая диафрагма  $\alpha=55^\circ$

Но в области значений  $l/d < 0,06$  характеристики конических диафрагм резко возрастают, что ухудшает регулирующие качества устройства.

Очевидно, полученные результаты распространяются на все такие устройства с геометрически подобными размерами при турбулентном режиме течения. Зависимости  $\zeta$  и  $k$  от  $l/d$  можно приближенно аппроксимировать степенными функциями:

$$\zeta = a1 \cdot (l/d)^{b1}, \quad (4)$$

$$k = a2 \cdot (l/d)^{b2}. \quad (5)$$

В таблице представлены значения коэффициентов, входящих в формулы (4 и 5), для исследованного диапазона значений  $l/d$ .

Таблица

Значения коэффициентов  $a1, a2, b1, b2$ 

Вариант расчетной схемы	$a1$	$a2$	$b1$	$b2$
Цилиндр. тело $l_m/d=0,625$ , плоская диафрагма	2,211	1,020	-1,263	-1,439
Цилиндр. тело $l_m/d=0,312$ , плоская диафрагма	2,202	0,837	-1,258	-1,51
Цилиндр. тело $l_m/d=0,625$ , коническая диафрагма $\alpha=40^\circ$	0,729	0,831	-1,701	-1,672
Цилиндр. тело $l_m/d=0,625$ , коническая диафрагма $\alpha=55^\circ$	1,178	1,083	-1,571	-1,583

### Заключение

На основе численного моделирования рассчитаны распределения давлений в сечениях осесимметричного течения в канале с цилиндрическим телом и диафрагмой при переменном расстоянии  $l$  от цилиндрического тела до края диафрагмы. Сведения о распределении давлений позволили определить коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  и коэффициент  $k$ , характеризующий аэродинамическую силу, воздействующую на цилиндрическое тело в зависимости от относительного размера  $l/d$  для разных вариантов длины цилиндрического тела и конусности диафрагмы.

Полученные данные распространяются на все такие устройства с геометрически подобными размерами при турбулентном режиме течения.

Результаты исследования могут быть использованы при конструировании регуляторов потоков, в том числе стабилизаторов расхода, поддерживающих приблизительно постоянный заданный расход воздуха и этим обеспечивающих рациональное использование энергии.

### Список библиографических ссылок

1. Пат. RU № 2527725 Российская федерация, МПК F24F13/08. Энергосберегающий регулятор расхода воздуха систем естественной вентиляции / Ю.Х. Хабибуллин; Заявитель и патентообладатель Ю.Х. Хабибуллин. № 2013115179/12; заявл. 04.04.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25. – 2 с.
2. Пат. SU № 2541295 Российская федерация, МПК F24F13/08. Устройство стабилизации расхода воздуха / В.А. Бройда; Заявитель и патентообладатель КГАСУ. – Заявка 2013124553/12; заявл. 28.05.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. – 2 с.
3. Пат. SU № 2547602 Российская федерация, МПК F24F13/00. Устройство стабилизации расхода воздуха / В.А. Бройда; Заявитель и патентообладатель КГАСУ. – № 2013151943/12; заявл. 21.11.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. – 4 с.
4. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. – М.: «АВОК-ПРЕСС», 2008. – 209 с.
5. Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Батталова А.В. К определению коэффициентов местных возмущающих элементов трубопроводных систем // Известия Вузов. Строительство, 2012, № 9. – С. 108-112.
6. Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Мударисов Д.И. О протяженности зон влияния возмущающих элементов трубопроводных систем // Известия КГАСУ, № 2 (28), 2014. – С. 121-126.
7. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н., Гимадиева Г.А. Сопротивление плоского приточного тройника на слиянии // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Материалы XIII Международной научной конференции 15-28 апреля 2015. – Сиань, 2015. – С. 334-338.

8. Справочник проектировщика. ЧЗ. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2. – М.: Стройиздат, 1992. – 416 с.

**Broyda V.A.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: broida@mail.ru

**Safiullin F.F.** – magistrate

E-mail: fanfagsaf@rambler.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Numerical study of the cylindrical body aerodynamics in a duct with a diaphragm

#### Resume

The problem is solved by numerical simulation (CFD). Velocity and pressure fields of axisymmetric flow in a duct with a cylindrical body and a diaphragm at a variable distance  $l$  from the cylindrical body to the edge of the diaphragm are calculated.

Verification of numerical method performed by comparing the calculated value of the coefficient of local resistance of the diaphragm with its experimental value obtained from reference literature.

Pressure distribution at the beginning and end of the calculation area allowed to determine local resistance coefficient  $\zeta$ . Pressure distribution on the front and back surfaces of the cylindrical allowed to calculate the coefficient  $k$ , which characterizes the impact of the flow on a cylindrical body.  $\zeta$  and  $k$  values are presented depending on the relative size – ratio of the distance  $l$  to the channel diameter  $d$ . The calculations were performed for different variants of the length of the cylindrical body and cone diaphragm. The data apply to all such devices with a geometrically similar size in the developed turbulent flow regime.

The results can be used in the design flow regulators, ensuring the rational use of energy.

**Keywords:** duct, diaphragm, cylindrical body, pressure.

#### Reference list

1. Pat. RU № 2527725 Russian Federation, MPK F24F13/08. Energy-saving flow rate control systems, natural ventilation / U.H. Habibullin (RU); Patent holder U.H. Habibullin (RU). – № 2013115179/12; appl. 04.04.2013; Published 10.09.2014, Bulletin № 25. – 2 p.
2. Pat. RU № 2541295 Russian Federation, MPK F24F 13/08. 13/08 Device for air supply stabilization / V.A. Broyda (RU); Patent holder FGBUVO «Kazan State University of Architecture and Engineering» KGASU. № 2013124553/12; appl. 28.05.2013; Published 10.02.2015, Bulletin № 4. – 2 p.
3. Pat. RU № 2547602 Russian Federation, MPK F24F 13/08. 13/00 Device for air supply stabilization / V.A. Broyda (RU); Patent holder FGBUVO «Kazan State University of Architecture and Engineering» KGASU (RU). – № 2013151943/12; appl. 21.11.2013; Published 10.04.2015, Bulletin № 10. – 4 p.
4. Posochin V.N. Aerodynamics ventilation. – М.: «AVOK-PRESS», 2008. – 209 p.
5. Posochin V.N., Ziganshin A.M., Battalova A.V. By definition, local factors disturbing elements of pipeline systems // Izvestija vuzov. Stroitelctvo, 2012, № 9. – P. 108-112.
6. Posochin V.N., Ziganshin A.M., Mudarisov D.I. About the length of the zones of influence of the disturbing elements of pipeline systems // Izvestiya KGASU, № 2 (28), 2014. – P. 121-126.
7. Ziganshin A.M., Badukova L.N., Gimadieva G.A. The resistance of the flat at the confluence of the supply tee // Indoor air quality and the environment. Proceedings of XIII International Scientific Conference 15-28 April 2015. – Xi'an, 2015. – P. 334-338.
8. Directory designer. Part 3. Ventilation and air conditioning. Book 2. – М.: Stroyizdat, 1992. – 416 p.