

УДК 532.5.032+532.55

Варсегова Е.В. – кандидат физико-математических наук

E-mail: evarsegova@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Ахмерова Д.Р. – инженер

E-mail: dilkin93@list.ru

ООО «Норд-Трейд»

Адрес организации: 420012, Россия, г. Казань, ул. Ульянова-Ленина, д. 19

Исследование течения в каналах различных форм

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – численно с помощью пакета программ Fluent исследовать пространственное течение воздуха на прямолинейном участке воздуховода при различных формах канала (поперечное сечение канала было взято в форме круга, эллипса, овала, прямоугольника). Результаты численного моделирования сравнить с экспериментальными данными и расчетами других авторов.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что выбраны такие формы канала, которые обладают наименьшим сопротивлением, что позволит сократить энергию, потребляемую системой вентиляции.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что найдены коэффициенты сопротивления трения труб некруглого сечения. Оптимальной формой сечения канала является, конечно же, круг. Однако воздуховоды плоскоовального сечения имеют наиболее близкий коэффициент сопротивления к данным круга, что говорит о целесообразности применения подобных каналов.

Ключевые слова: вентиляция, овальный канал, круглый канал, прямоугольный канал, численное моделирование, трехмерное течение, коэффициент сопротивления.

Введение

В настоящее время системы вентиляции необходимы не только при крупном промышленном производстве или устройстве специализированных лабораторий, но также и при создании здорового микроклимата в собственном доме. Грамотное проектирование и монтаж вентиляционных систем в помещениях дома поможет обеспечить его свежим воздухом в нужном объеме. Наличие вентиляции в собственном доме имеет особую важность для обеспечения здоровой среды людям, проводящим в помещении большую часть своего времени. Современные правильно спроектированные вентиляционные системы не потребляют много электрической энергии, и соответствует современным требованиям в этой области [1, 2].

При проектировании системы вентиляции и выборе формы воздухопроводов часто стоит выбор между компактностью прямоугольных и высокой эффективностью круглых воздухопроводов. Есть возможность сэкономить пространство или снизить потери давления воздуха. Существует решение, которое позволяет совместить преимущества и тех и других воздухопроводов – это применение плоскоовальных воздухопроводов. Такие воздухопроводы характеризуются меньшим сопротивлением потоку воздуха в сравнении с прямоугольными воздухопроводами, а значит потери давления в них меньше. Компактная форма и привлекательный внешний вид позволяет соперничать плоскоовальным воздухопроводам с круглыми. Эффективность воздухопроводов круглого сечения все же остается выше.

В связи с широким применением плоскоовальных воздухопроводов, актуальными являются исследования таких воздухопроводов, с целью разработки рекомендаций по их изготовлению и совершенствованию. В том числе необходимо выбрать такую форму сечения канала, которая позволит снизить затраты на аэродинамическое сопротивление воздухопроводов. Поэтому в настоящей работе исследуется влияние формы канала на сопротивление трения и на основании результатов исследований, подбирается оптимальная форма канала, с точки зрения уменьшения сопротивления. Задача решается

численно с использованием универсального многоцелевого вычислительного программного комплекса Fluent, который способен решать задачи гидродинамики и теплообмена, моделировать многофазные среды, а также процессы, связанные со сложными физико-химическими взаимодействиями [3-6].

Постановка задачи

Рассматривалось пространственное течение воздуха (плотность $\rho=1,225$ кг/м³, динамический коэффициент вязкости $\mu=1,789 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с) на прямолинейном участке трубопровода при различных формах канала (поперечное сечение канала было взято в форме круга, эллипса, овала, прямоугольника). Исследуемые формы канала отличались площадью, формой и соотношением определяющих величин (табл. 1). Геометрия расчетной области с овальным сечением канала приведена на рис. 1 а. Рассматривались и другие формы сечения канала (рис. 1 б-д). Длина канала принята постоянной $l=3$ м.

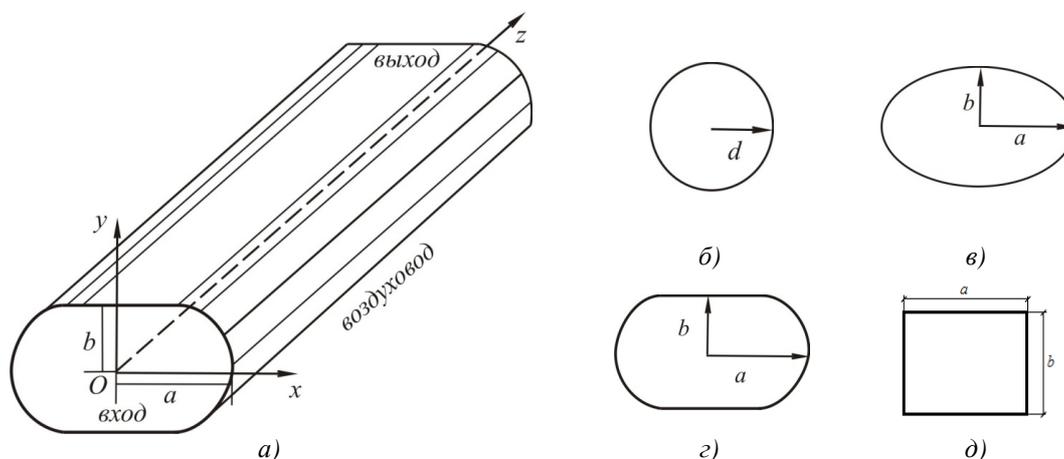


Рис. 1. Расчетная область: а – геометрия канала; б – круглое сечение; в – эллиптическое сечение; г – овальное сечение; д – прямоугольное сечение

Таблица 1

Характеристики рассчитываемых сечений каналов

Параметр	Размерность	Форма сечения канала					
		Эллипс 1	Эллипс 2	Эллипс 3	Прямоугольник	Круг	Овал
1	2	3	4	5	6	7	8
a , большая полуось	м	0,15	0,1	0,0625	0,1	0,05	0,0625
b , малая полуось	м	0,03	0,025	0,04	0,0785	0,05	0,0359
Площадь, S	м ²	0,0141	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
Периметр, Π	м	0,565	0,393	0,322	0,357	0,314	0,332
Гидравлический диаметр, D_r	м	0,100	0,080	0,098	0,088	0,100	0,095

Решение

Основной расчетной формулой для потерь давления при турбулентном течении жидкости в прямых каналах постоянного поперечного сечения является эмпирическая формула Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_{тр} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{S_0}{S} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\Pi l}{S} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{l}{R_r} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \lambda \cdot \frac{l}{D_r} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где Π – периметр, м; R_r – гидравлический радиус, м; S_0 – площадь поверхности трения, м²; λ – коэффициент сопротивления воздуха; v – средняя скорость потока в сечении, м/с.

Расчет основных параметров течения потока в канале производился численно с помощью программы Fluent, в котором решаются уравнения движения жидкости – уравнения Навье-Стокса. Моделируется развитое турбулентное течение, и для замыкания системы используется модель турбулентности. К сожалению, в настоящее время не

существует универсальной модели. Ее выбор зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и затрат времени, необходимых на процесс моделирования. После проведения тестирования различных моделей турбулентности, была выбрана стандартная модель $k-\varepsilon$ (Standard Wall Function).

В качестве граничных условий были выбраны следующие: воздуховод – непроницаемая поверхность, на входе потока задавался постоянный расход равный $L=0,1$ кг/с, на выходе – избыточное давление $\Delta p_{\text{вых}}=0$ (рис. 1а).

На первом этапе решения проводилась проверка на «сеточную зависимость». При численном исследовании течений в каналах важным является использование пристеночных функций, а также правильное измельчение (адаптация) сетки вблизи твердых поверхностей. В ходе адаптации сетки, было выявлено, что пристеночное моделирование на характеристики рассматриваемого течения и результаты численного исследования не влияют (рис. 2).

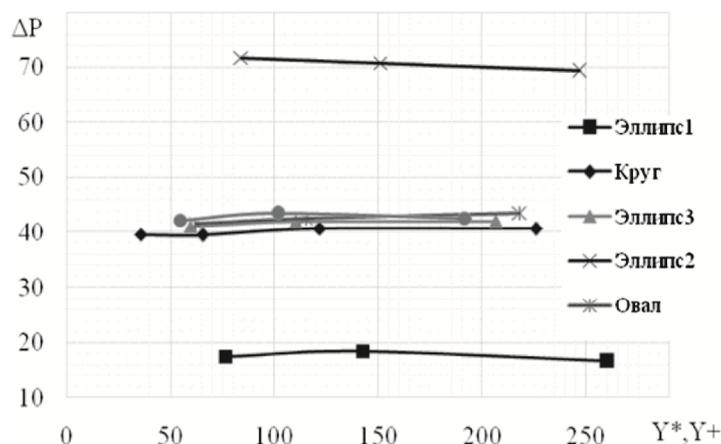


Рис. 2. Графики зависимости $\Delta p=f(Y^*, Y^+)$

Численное решение позволило получить значения давления на входе и выходе, которые были использованы для расчета коэффициента сопротивления воздуховода по формуле:

$$\lambda = \frac{D_r}{l} \cdot \frac{\Delta p}{p_d}, \quad (2)$$

где $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$ – потери полного давления в воздуховоде, $p_d = \rho v^2 / 2$ – динамическое давление.

Для подтверждения адекватности численных решений было выполнено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными и расчетами других авторов для каналов аналогичной геометрии [7-9].

Теоретический коэффициент сопротивления определялся по формуле:

$$I_{\text{теор}} = 0,11 \left(\frac{k_s}{D_r} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где $k_s=0$ – коэффициент эквивалентной шероховатости, а число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{LD_r r}{mS}.$$

Использование гидравлического (эквивалентного) диаметра в качестве характерного размера в формуле сопротивления (3) допустимо в тех случаях, когда почти всему периметру сечения толщина пристеночного слоя очень мала по сравнению с размером поперечного сечения канала ($\delta_0 \ll D_c$).

Коэффициент сопротивления трения труб некруглого сечения проще определять введением в формулы для труб круглого сечения соответствующих поправочных коэффициентов [7]:

$$\lambda_n = k_n \cdot \lambda_{\text{теор}},$$

где λ_n – коэффициент сопротивления трения для труб некруглого сечения;

$\lambda_{теор}$ – коэффициент сопротивления трения труб круглого сечения при этом же числе Рейнольдса;

k_n – поправочный коэффициент учитывающий влияние формы поперечного сечения труб.

Поправочный коэффициент для труб эллиптического сечения, зависит от отношения осей эллипса. При турбулентном течении с некоторым приближением применяется $k_{эл} \approx 1,0$. Для труб прямоугольного сечения – $k_{пр} = 1,0 \div 1,1$. При $a/b = 1,0$ поправочный коэффициент $k_{пр} = 1,0$, а если $a/b \rightarrow 0$, то $k_{пр} = 1,1$.

Результаты расчетов коэффициентов сопротивления, полученных с помощью Fluent по формуле (2) и по теоретической формуле (3) для всех рассчитанных моделей представлены в табл. 2. Сравнение результатов показывает хорошее совпадение.

Таблица 2

Результаты расчетов коэффициентов сопротивления

Сечение канала	D_r , м	Re	P_d , Па	$P_{вых}$, Па	$P_{вх}$, Па	ΔP , Па	λ	$\lambda_{теор}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Круг	0,100	58115	66,24	70,88	110,51	39,63	0,0199	0,0203
Эллипс 1	0,100	32286	20,44	21,39	38,95	17,56	0,0286	0,0236
Эллипс 2	0,080	46492	66,24	71,71	128,35	56,64	0,0228	0,0215
Эллипс 3	0,098	56697	66,24	70,85	111,92	41,07	0,0202	0,0205
Овал	0,095	54898	65,40	70,28	111,98	41,70	0,0200	0,0206
Прямоугольник	0,088	51115	62,57	71,39	118,47	47,08	0,0209	0,0210

Рассчитав коэффициенты сопротивления, были построены зависимости изменения коэффициента сопротивления от числа Re для всех исследуемых каналов (рис. 3). На этом же графике были нанесены соответствующие линии теоретического коэффициента сопротивления.

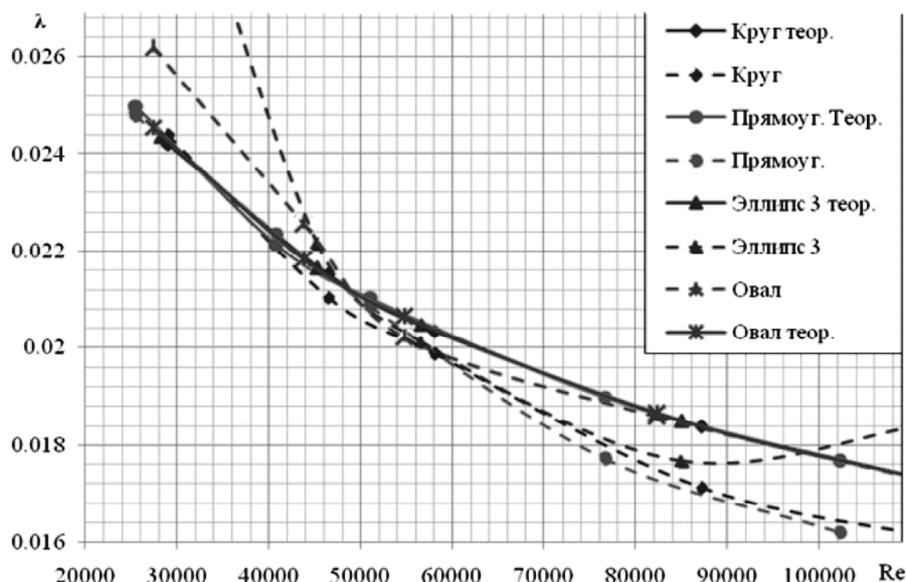


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Re

На основе проделанных расчетов можно сделать вывод, что оптимальной формой сечения канала является, конечно, круг. Модель «Овал» имеет наиболее близкий коэффициент сопротивления к данным круга, что говорит о целесообразности применения подобных каналов.

Заключение

Самая оптимальная форма сечения воздуховодов – круглая, проведенные, расчеты это подтверждают. Наиболее невыгодными формами сечения канала являются прямоугольные и некоторые эллиптические. Однако, прямоугольная форма воздуховодов обычно применяется в системах вентиляции. Это объясняется тем, что в большинстве случаев приходится размещать вентиляционные каналы в ограниченном пространстве. При одинаковой высоте круглого и прямоугольного воздуховода, сечение последнего может быть в разы больше. Каналы овального сечения уступают по своим характеристикам круглым, но исследования показали, что можно выбрать наиболее благоприятную форму. Овальная форма определенного поперечного сечения обеспечивает меньшую площадь контакта, что способствует свободному потоку воздуха в сравнении с прямоугольной формой канала, имеет меньшее сопротивление. В некоторых случаях результаты коэффициента сопротивления близки к круглым каналам. С экономической точки зрения, уменьшение сопротивления приводит к уменьшению затрат на вложение, что говорит о целесообразности применения подобных каналов при необходимости и обоснованности решения. Эксплуатационные расходы прямоугольного канала больше, чем плоскоовального, что указывает на выбор второго воздуховода [10]. Также преимуществами плоскоовального воздуховода являются высота и эстетичность, в сравнении с круглыми. Однако сложность изготовления фасонных деталей плоскоовальных воздуховодов в настоящее время вытесняют их на задний план.

Список библиографических ссылок

1. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. 209 с.
2. Королева Т. И., Широкова О. Н. Исследование распределения воздуха по длине воздуховодов равномерной раздачи // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф, Прикладные науки. Строительство. 2009. № 12. С. 89–94.
3. Мухаметзянова А. Г., Дьяконов Г. С., Кульментьева Е. И. Современные компьютерные технологии в исследовании течений в каналах различной геометрии // Вестник Казанского Технологического университета. 2005. № 2. С. 164–172.
4. Никущенко Д. В. Применение расчетного комплекса FLUENT для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости. СПб. : СПбГМТУ, 2005. 97 с.
5. Nuno M. C. Martins, Nelson J. G. Carrigo, Helena M. Ramos, Didia I. C. Covas. Velocity distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis // Instituto Superior Tecnico. Universidade de Lisboa, Portugal. 2014. 18 p.
6. Зиганшин А. М. Снижение энергозатрат при движении потоков путем профилирования фасонных частей в коммуникациях энергоустановок // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 1. С. 63–68.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
8. Muzychka Y. S., Yovanovich M. M. Pressure Drop in Laminar Developing Flow in Noncircular Ducts: A Scaling and Modeling Approach // Journal of Fluids Engineering, 2009. Vol. 131/111105-1. 11 p.
9. Волгин Г. В. Уточнение методов расчета коэффициента гидравлического сопротивления гладких открытых каналов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12, Вып. 1 (100). С. 94–98.
10. Самарин О. Д. Оптимизация диаметров воздуховодов систем вентиляции и кондиционирования воздуха // С.О.К. 2010. № 12. С. 37–42.

Varsegova E.V. – candidate of physical and mathematical sciences

E-mail: evarsegova@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Akhmerova D.R. – engineer

E-mail: dilkin93@list.ru

LTD «Nord-Trade»

The organization address: 420012, Russia, Kazan, Ulyanova-Lenina st., 19

Research of the flow in channels of different forms

Abstract

Problem statement. The aim of the study was to study numerically the spatial flow of air in a straight section of the duct with the help of the Fluent software package for various channel shapes (the channel cross-section was taken in the form of a circle, ellipse, oval, rectangle). The results of numerical simulation are compared with the experimental data and calculations of other authors.

Results. The main results of the study are that such forms selected channels, which have the least resistance, which will reduce the energy consumed by the ventilation system.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that the friction coefficients of pipes of non-circular cross-section are found. The optimal shape of the channel cross section is, of course, the circle. However, the ducts of the flat-oval cross section have the closest coefficient of resistance to the data of the circle, which indicates the advisability of using such channels.

Keywords: ventilation, oval channel, numerical modeling, three-dimensional flow, coefficient of resistance.

References

1. Posokhin V. N. Aerodynamics of ventilation. M. : AVOK-PRESS, 2008. 209 p.
2. Koroleva T. I., Shirokova O. N. Investigation of air distribution along the length of air ducts of uniform distribution // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. F, Prikladnie nayki. Stroitelstvo. 2009. № 12. P. 89–94.
3. Mukhametzyanova A. G., Dyakonov G. S., Kulmenteva E. I. Modern computer technologies in the study of flows in channels of various geometries // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo universiteta. 2005. № 2. P. 164–172.
4. Nikushchenko D. V. Application of the computational complex FLUENT for modeling viscous incompressible fluid flows. SPb. : SPbGMTU. 2005. 97 p.
5. Nuno M. C. Martins, Nelson J. G. Carrigo, Helena M. Ramos, Didia I. C. Covas. Velocity distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis // Instituto Superior Tecnico. Universidade de Lisboa, Portugal. 2014. 18 p.
6. Ziganshin A. M. Reduction of energy consumption in traffic flow by profiling fittings in communications power plants // Nadegnost i bezopasnost energetiki. 2015. № 1. P. 63–68.
7. Idelchik I. E. Handbook of hydraulic resistance. Edition 3, recycled and additional. M. : Mashinostrieniye, 1992. 672 p.
8. Muzychka Y. S., Yovanovich M. M. Pressure Drop in Laminar Developing Flow in Noncircular Ducts: A Scaling and Modeling Approach // Journal of Fluids Engineering. 2009. Vol. 131/111105-1. 11 p.
9. Volgin G. V. Refinement of methods for calculating the coefficient of hydraulic resistance of smooth open channels // MGSU. 2017. T. 12, Iss. 1 (100). P. 94–98.
10. Samarin O. D. Optimization of the diameters of the ducts of systems of ventilation and air-conditioning // S.O.K. 2010. № 12. P. 37–42.