

Рымаров А.Г., канд. техн. наук, доц.,
Агафонова В.В., ассистент

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АДАПТАЦИЯ СТАНДАРТНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙ ДЛЯ СЛУЧАЯ ЛАМИНАРНОГО РЕЖИМА ИСТЕЧЕНИЯ

agafonovavv@mgsu.ru

Повышение эффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха помещений зданий гражданского назначения связано с применением на практике новых типов воздухораспределительных устройств – микроперфорированных текстильных воздухопроводов. Основным преимуществом такого типа воздухораспределителей является подача приточного воздуха быстрозатухающими ламинарными микроструями. В настоящее время существующие подходы по расчету основных параметров приточных струй (осевой, продольной скорости) ориентированы на турбулентный режим истечения и не корректны для определения параметров ламинарных микроструй. В статье представлены результаты по адаптации существующих инженерных методик расчета для решения задач в ламинарной постановке. Уточнены расчетные формулы И.А. Шепелева, путем введения полученных зависимостей аэродинамической характеристики струи m и постоянной c , входящих в расчетную формулу, от кинематического импульса струи K для случая ламинарного истечения микроструй, истекающих из отверстия круглой формы.

Ключевые слова: микроперфорированный текстильный воздухопровод, компактная струя, микроструя, ламинарные струи, аэродинамические характеристики струи.

Одной из основных задач вентиляции гражданских зданий является подача приточного воздуха в нужном объеме и с требуемыми параметрами в зону дыхания человека, что до настоящего времени было сложно осуществить посредством существующих типов воздухораспределителей из-за высоких скоростей приточного воздуха. Преимуществом микроперфорированных текстильных воздухопроводов является возможность подачи приточного воздуха быстрозатухающими ламинарными микроструями, истекающими из микроотверстий ($d=0,0002-0,0006$ м), прожигаемых в ткани лазером [1, 2], что исключает возможность появления эффекта сквозняка в рабочей зоне помещения, способствует формированию требуемых параметров микроклимата [3, 4]. Ряд численных и экспериментальных исследований, выполненных зарубежными авторами [5–9], позволяет сделать вывод, что воздушное душирование рабочих мест способствует улучшению качества воздуха в зоне дыхания работников.

Микроперфорированные текстильные воздухораспределители начали применяться в России относительно недавно, поэтому в справочной литературе отсутствует информация, необходимая для проектирования систем вентиляции с использованием такого вида устройств.

Проведенный анализ существующих инженерных методик расчета основных параметров струй показал, что общим недостатком методик И.А. Шепелева [10], Г.Н. Абрамовича [11], С.-Ж.

Чен и W. Rodi [12] является то, что они предназначены для решения задач в турбулентной постановке. Методика Г. Шплихтинга [13] позволяет определять параметры ламинарных струй, однако необходимо для каждого рассматриваемого случая определять полюс струи, находящийся на расстоянии x_0 от приточного отверстия, что повышает трудоемкость расчета.

Анализ возможного сочетания диаметра ($d=0,0002-0,0006$ м) приточных микроотверстий текстильных воздухопроводов и начальной скорости истечения воздуха ($u = 0,9-6,5$ м/с) дает представление о диапазоне варьирования числа Рейнольдса: $Re=3-270$. Таким образом, для микроструй, истекающих из микроотверстий характерен ламинарный режим истечения. В этой связи возникает необходимость в адаптации существующей методики расчета основных параметров струй для случая ламинарного истечения.

За основу был принят инженерный метод расчета, приведенный в работе И.А. Шепелева [5] для расчета скорости струи:

$$u = \frac{m \cdot u_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x} \cdot e^{-0,5 \cdot \left(\frac{y}{cx}\right)^2} \quad (1)$$

где u_0 – средняя скорость истечения, u_x – осевая скорость струи, F_0 – площадь приточного отверстия, x и y – координаты точки, c – постоянная, m – аэродинамическая характеристика приточной струи.

Для осевой скорости струи, при $y=0$, формула (1) принимает следующий вид:

$$u_x = \frac{m \cdot u_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x} \quad (2)$$

Значение аэродинамической характеристики изотермической турбулентной струи в соответствии с [10] составляет $m=6,88$, вероятное значение постоянной $c=0,082$.

С целью расширения границы применения расчетных формул (1) и (2) необходимо уточнить значения вышеуказанных постоянных.

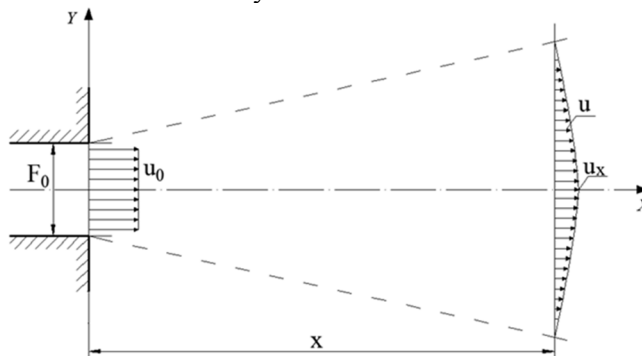


Рис. 1. Схема струи

Была рассмотрена струя (рис. 1) при различных сочетаниях диаметра приточного отверстия ($d=0,00025; 0,0004; 0,0006$ м) и значениях начальной скорости ($u=0,2-6,6$ м/с). Кинематический импульс струи (K) изменялся в пределах от $1,96 \cdot 10^{-9}$ до $1,23 \cdot 10^{-5}$ м⁴/с². Кинематическая вязкость воздуха $\nu=14,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, температура воздуха $t=20$ °С, плотность воздуха $\rho=1,2$ кг/м³, режим истечения – ламинарный.

При уточнении аэродинамической характеристики струи m и постоянной c , входящих в расчетные формулы (1) и (2), были последовательно решены следующие задачи при ламинарном режиме истечения микроструи.

Задача 1. Определено изменение осевой скорости микроструи (u_0 , м/с) от расстояния (x , м) от приточного отверстия при различных вариантах исходных данных по методике И.А. Шепелева [10] и Г. Шлихтинга [13].

Методом последовательного приближения, меняя значение m , выполнено совмещение графика, построенного с помощью расчетной формулы (2) методики [10] с графиком, построенным по результатам расчета в соответствии с методикой [13] (пример - рис. 2). По результатам расчета был построен график изменения значения аэродинамической характеристики струи от кинематического импульса микроструи (K , м⁴/с²) (рис. 3).

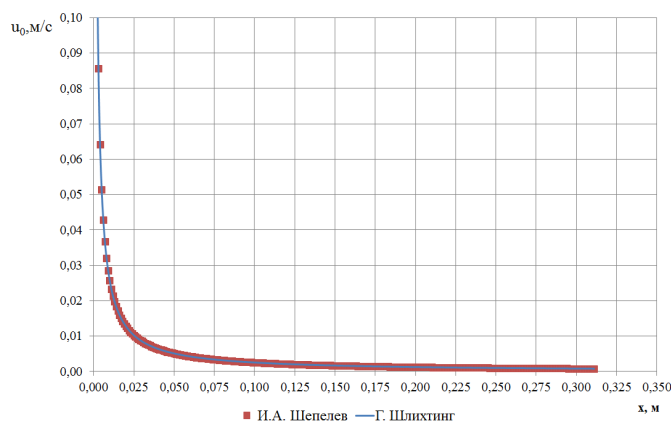


Рис. 2. Сопоставление графиков осевой скорости микроструи при $K= 0,45216 \cdot 10^{-7}$ м⁴/с²

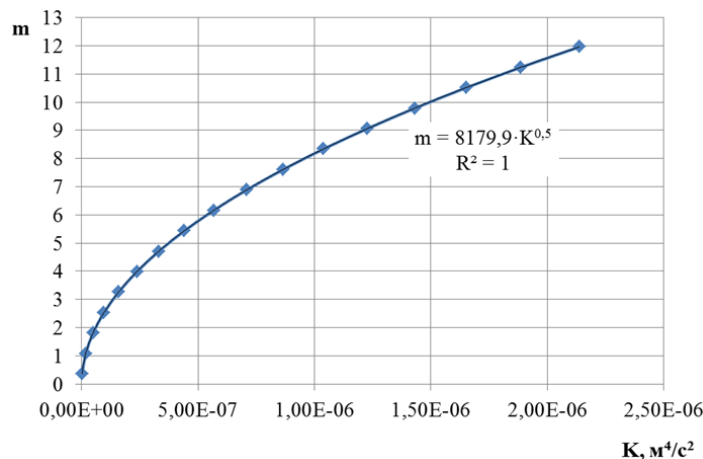


Рис. 3. Изменение значения аэродинамической характеристики струи m в зависимости от кинематического импульса K

В результате аппроксимации получена следующая зависимость:

$$m = 8179,9 \cdot K^{0,5} \quad (3)$$

Задача 2. Были определены профили продольной скорости микроструи на различном расстоянии от приточного отверстия ($x=0,0011; 0,002; 0,003; 0,006; 0,008; 0,01$ м) при заданных значениях кинематического импульса микро-

струи. Аналогично алгоритму, представленному при решении задачи 1, методом последовательного приближения, меняя значения постоянной c было выполнено совмещение графиков продольной скорости микроструи (пример – рис. 4). По результатам расчета был построен график изменения значения постоянной c от кинематического импульса микроструи K (рис. 5).

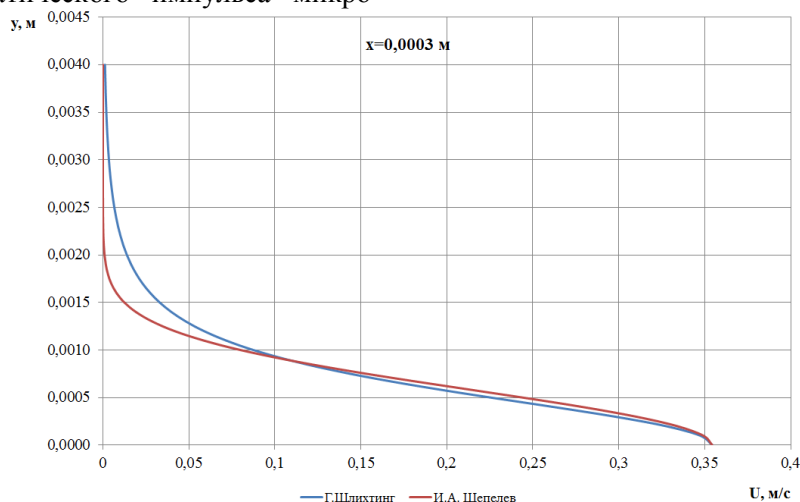


Рис. 4. Сопоставление графиков продольной скорости микроструи при $x=0,0003$ м

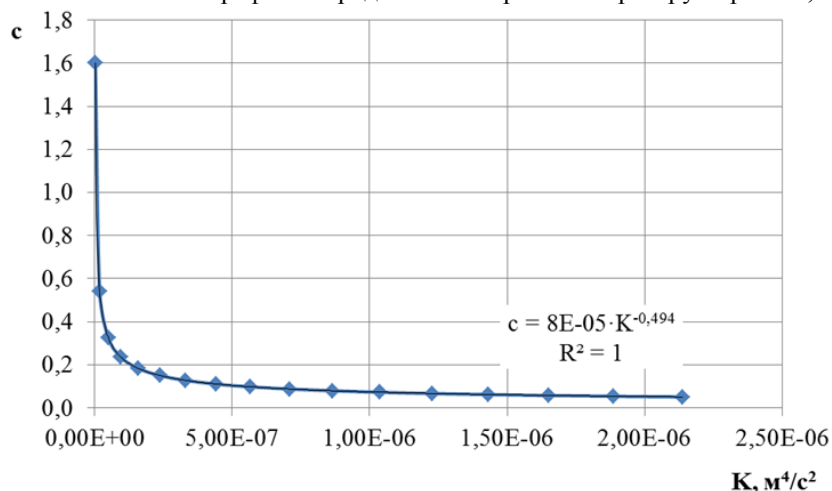


Рис. 5. Изменение значения постоянной c в зависимости от кинематического импульса K

В результате аппроксимации получена следующая зависимость постоянной c от кинематического импульса микроструи K :

$$c = 8 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-0,494} \quad (4)$$

Заменяя значения аэродинамической характеристики струи m и постоянной c в расчетных формулах (1) и (2) полученными зависимостями (3) и (4), запишем адаптированные формулы для расчета продольной и осевой скорости ламинарной микроструи, получим:

продольная скорость ламинарной микроструи:

$$u = \frac{8180 \cdot K^{0,5} \cdot u_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x} \cdot e^{-0,5 \cdot \left(\frac{y}{8 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-0,494} \cdot x} \right)^2}$$

осевая скорость ламинарной микроструи:

$$u_x = \frac{8180 \cdot K^{0,5} \cdot u_0 \cdot \sqrt{F_0}}{x}$$

Выводы. В результате проведенного исследования, расширена область применимости инженерной методики И.А. Шепелева применительно к ламинарному режиму истечения струи. Получена зависимость аэродинамической характеристики струи m и постоянной c от кинематического импульса струи K для ламинарных микроструй. Разработанные модификации корреляций, позволяют определять основные параметры микроструй (осевую, продольную скорости) с погрешностью, не превышающей 3 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. 664 с.
2. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. 59 с.
3. Рымаров А.Г., Агафонова В.В. Особенности истечения воздуха микроструями // Приволжский научный журнал. 2015. №1. С. 60–64.
4. Рымаров А.Г., Агафонова В.В. Исследование возможности применения текстильных воздуховодов в системах вентиляции // Естественные и технические науки. 2015. №2. С. 141–143.
5. Nielsen P.V., Topp C., Sonnichsen M. et al. Air distribution in rooms generated by a textile terminal—comparison with mixing and displacement ventilation //ASHRAE Transaction. 2005. Vol. 8 (1). Pp. 733–739.
6. Nielsen P.V., Hyldgaard C.E., Melikov A. Comparison between different air distribution systems // Aalborg University and International Centre for Indoor Environment and Energy. 2007. Denmark. 17 p.
7. Nielsen P.V. Personal exposure between people in a room ventilated by textile terminals: with and without personalized ventilation // HVAC&R Research. 2007. Vol. 13 (4). Pp. 635–644.
8. Pinkalla C. Fabric duct air dispersion for HVAC systems // Construction Specifier. 2003. Vol. 56 (6). Pp. 57–64.
9. Chen F., Chen H., Xie J. et al. Air distribution in room ventilated by fabric air dispersion system // Building and Environment. 2011. Vol. 46 (11). Pp. 2121–2129.
10. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
11. Абрамович Т.Н. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1976. 623 с.
12. Chen C.-J., Rodi W. Vertical turbulent buoyant jets: a review of experimental data. NASA STI/Recon Technical Report A 80. 1980. 96 с.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. Г.А. Вольперта с 5-го нем. изд., испр. по 6-му (амер.) изд. Под ред. Л.Т. Лойцянского. М.: "Наука". 1974. 711 с.

Информация об авторах

Рымаров Андрей Георгиевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции.

E-mail: rymarov@yandex.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Агафонова Вера Валерьевна, ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

E-mail: agafonovavv@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила в январе 2018 г.

© Рымаров А.Г., Агафонова В.В., 2018

A.G. Rymarov, V.V. Agafonova

ADAPTATION OF THE STANDARD ENGINEERING METHOD OF CALCULATING THE MAIN PARAMETERS OF JETS FOR THE LAMINAR FLOW MODE

Increasing the efficiency of ventilation and air conditioning systems in civil buildings is associated with the use of new types of air distribution devices – micro-perforated textile ducts. The main advantage of this type of air distributor is the supply of fresh air with rapidly damping laminar micro-jets. At present, the existing approaches to calculating the main parameters of the supply jets (axial and longitudinal velocity) are oriented to the turbulent flow regime and are not adequate for determining the parameters of laminar micro-jets. The article presents the results of adapting the existing engineering calculation techniques for solving problems in a laminar setting. The Shepelevs formula is adapted to calculate the basic parameters of laminar micro-jets by introducing the obtained dependences of the aerodynamic characteristics of the jet m and the constant c , contained in the calculation formula, on the kinematic momentum of the jet K for laminar micro-jets flowing out of a round opening.

Keywords: *microperforated textile air duct, circular jet, micro-jets, laminar jets, aerodynamic characteristics of the jet.*

REFERENCES

1. Grigoriants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing. Moscow: Izd-vo MSTU. NE Bauman. 2006. 664 p.
2. Parfenov V.A. Laser microprocessing of materials: Proc. allowance. SPb.: Publishing house SPbGETU «LETI». 2011. 59 p.
3. Rymarov A.G., Agafonova V.V. Features of air discharge by micro-jet // Privolzhsky scientific journal, 2015, no. 1, pp. 60–64.
4. Rymarov A.G., Agafonova V.V. Investigation of the possibility of using textile air ducts in ventilation systems // Natural and technical science, 2015, no. 2, pp 141–143.
5. Nielsen P.V., Topp C., Sonnichsen M. et al. Air distribution in rooms generated by a textile terminal—comparison with mixing and displacement ventilation //ASHRAE Transaction, 2005, vol. 8 (1), pp. 733–739.
6. Nielsen P.V., Hyldgaard C.E., Melikov A. Comparison between different air distribution systems // Aalborg University and International Centre for Indoor Environment and Energy, 2007, Denmark, 17 p.
7. Nielsen P.V. Personal exposure between people in a room ventilated by textile terminals: with and without personalized ventilation // HVAC&R Research, 2007, vol. 13 (4), pp. 635–644.
8. Pinkalla C. Fabric duct air dispersion for HVAC systems // Construction Specifier, 2003, vol. 56 (6), pp. 57–64.
9. Chen F., Chen H., Xie J. et al. Air distribution in room ventilated by fabric air dispersion system // Building and Environment, 2011, vol. 46 (11), pp 2121–2129.
10. Shepelev I.A. Aerodynamics of air flows in the room. Moscow: Stroizdat, 1978, 144 p.
11. Abramovich T.N. The theory of turbulent jets. M.: Nauka, 1976, 623 p.
12. Chen C.-J., Rodi W. Vertical turbulent buoyant jets: a review of experimental data. NASA STI/Recon Technical Report A 80. 1980, 96 c.
13. Schlichting G. The theory of the boundary layer. Trans. G.A. Volpert with the 5th it. ed., Rev. on the 6th (amer.) ed. Ed. L.T. Loitsyanskogo. M.: "Science". 1974, 711 p.

Information about the author

Andrey G. Rymarov, PhD, Assistant professor.

E-mail: rymarov@yandex.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26

Vera V. Agafonova, Assistant.

E-mail: agafonovavv@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University).

Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26

Received in January 2018