

УДК 697.922.563+532.525.2

Посохин В.Н. – доктор технических наук, профессорE-mail: posohin@kgasu.ru**Зиганшин А.М.** – кандидат технических наук, доцентE-mail: amziganshin@kgasu.ru**Варсегова Е.В.** – кандидат физико-математических наук, доцентE-mail: evarsegova@yandex.ru**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

О численном определении характеристик приточного насадка

Аннотация

Постановка задачи. При расчете воздухораспределения используются данные о характеристиках струи, полученные экспериментально. Также считается, что распределение характеристик течения на выходе из приточного насадка равномерное или симметричное, что обычно не так. Предлагается методика определения кинематического и теплового коэффициентов приточных насадков, основанная на расчете характеристик течений с помощью пакета программ Fluent. Методика проиллюстрирована на примере расчета коэффициентов для струйного течения из щелевого отверстия, расположенного в стенке воздуховода в ряду других последовательно размещенных щелей. Учитывается неравномерность полей скорости, статического давления, избыточной температуры на истечении.

Результаты. В рамках предлагаемой методики определены кинематический коэффициент приточного насадка, профили продольной скорости в поперечных сечениях струи, а также угол, который составляет направление истечения струи с образующей воздуховода. Установлены факты отсутствия подобия профилей продольной скорости в сечениях основного участка струи, наличие поля избыточного статического давления на истечении.

Выводы. Возможно расчетное определение кинематических и тепловых характеристик воздухораспределителей. Полученные результаты указывают на необходимость корректировки подходов к анализу турбулентных струйных течений.

Ключевые слова: приточный насадок, кинематический и тепловой коэффициенты, отверстие в стенке, транзитный расход, направление истечения, численный метод.

Общеприняты формулы для расчета скорости u_{oc} и избыточной температуры Δt_{oc} на оси плоской слабонеизотермической струи-источника в виде [1-3]:

$$u_{oc} = \frac{1}{\sqrt[4]{p} \sqrt{c}} \sqrt{\frac{J_o}{lr_\infty}} \frac{1}{\sqrt{s}}, \quad (1)$$

$$\Delta t_{oc} = t_{oc} - t_\infty = \sqrt{\frac{1 + Pr_T}{2\sqrt{p} c}} \frac{Q_o}{lc_p r_\infty} \frac{1}{\sqrt{J_o / (lr_\infty)}}, \quad (2)$$

где J_o – начальный импульс струи (количество движения на единицу массового расхода воздуха); Q_o – тепловая мощность струи на истечении; c_p и ρ – удельная теплоемкость и плотность воздуха; l – длина щели, s – расстояние до сечения, в котором определяются осевые характеристики струи; Pr_T – турбулентное число Прандтля. Индекс «o» относится к значениям параметров на истечении, индекс «∞» – к значению плотности воздуха окружающего струю; c – экспериментальная константа.

Обычно считают, что статическое давление на выходе из отверстия равно нулю и тогда, если струя прямоочная:

$$J_o / l = q r_o u_o^2 h. \quad (3)$$

Здесь $q = \int_h u^2 dx / (u_o^2 h) = \int_0^1 \bar{u}^2 d\bar{x}$ коэффициент, учитывающий неравномерность поля

скорости на истечении; u – локальная скорость на истечении; u_o – средняя по площади скорость истечения; h – ширина щели; x – переменная интегрирования.

Для Q_o имеем:

$$Q_o / l = q_1 c_p r_o h u_o \Delta t_o, \quad (4)$$

где

$$q_1 = \int_h \Delta t u_s dx / (\Delta t_o u_o h) = \int_0^1 \Delta \bar{t} \bar{u} d\bar{x}.$$

В последних формулах $\bar{u} = u / u_o$, $\Delta \bar{t} = \Delta t / \Delta t_o$, $\bar{x} = x / h$. Объединяя равенства (1)-(4), получим:

$$u_{oc} = \frac{m u_o \sqrt{h}}{\sqrt{s}}, \quad (5)$$

где m – кинематический коэффициент приточного отверстия (насадка):

$$m = \frac{\sqrt{q}}{\sqrt[4]{p} \sqrt{c}}, \quad (6)$$

$$\Delta t_{oc} = \frac{n \Delta t_o \sqrt{h}}{\sqrt{s}}, \quad (7)$$

где n – тепловой коэффициент приточного отверстия:

$$n = \sqrt{\frac{1 + Pr_r}{\sqrt{p} c}} \frac{q_1}{\sqrt{q}}. \quad (8)$$

Поскольку непосредственное измерение полей скорости и температуры на выходе из насадка затруднительно, коэффициенты m и n обычно определяют, измеряя осевые характеристики в основном участке струи и обращая формулы (5), (7). Значения коэффициентов m и n для разных воздухораспределителей приведены, например в [2, 4]

Используя современные *CFD* – программы можно рассчитать поля скорости, температуры на выходе из насадка и определить значения m и n численно. Такой подход демонстрируется в работах [5-9]. Подобные расчеты показывают, что статическое давление на выходе из насадков может быть весьма существенным и значит, приведенные выше формулы, нуждаются в соответствующей корректировке.

Обратимся к конкретному примеру, когда струя формируется истечением из щелевого отверстия, расположенного в стенке воздуховода в ряду других последовательно размещенных щелей (рис. 1). Здесь мы имеем существенно более сложное течение, чем прямооточная струя. Наличие транзитного потока, проходящего мимо отверстия, обуславливает появление на истечении поперечной компоненты скорости, а также статического давления p_c отличного от нуля. Эти факторы нужно учитывать при определении начального импульса.

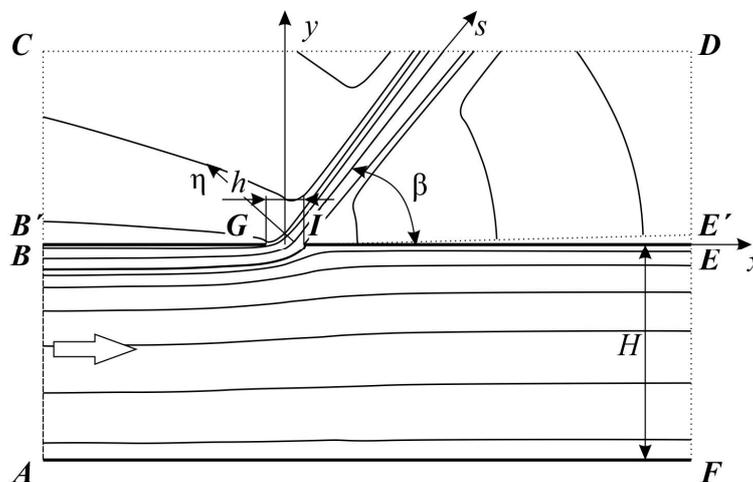


Рис. 1. Линии тока течения

Система уравнений плоского турбулентного движения замыкалась с помощью «стандартной» k - ε модели; при моделировании течения в пристеночных пограничных слоях использовались стандартные пристеночные функции.

Важно сделать одно замечание. При выборе границ расчетной области необходимо учитывать следующее обстоятельство. Разность давлений на границах струи, связанная с неодинаковыми размерами подобластей справа и слева от струи, приводит к тому, что она искривляется и настигается на стенку воздуховода – эффект Коанды (рис. 2). Практически этого не происходит, потому что реальная струя, строго говоря, не является плоской и поэтому разность давлений в подобластях справа и слева незначительна.

Чтобы избежать описанного эффекта, граница подобласти меньшего размера отклоняется от стенки на некоторый малый угол (рис. 1). Такой прием позволяет уравновесить давления в подобластях и исключить возможность искривления струи.

Итак, на границах расчетной области приняты следующие граничные условия: проницаемая граница AB – скорость $u_x = 1$ м/с (число Рейнольдса $Re = 6,7 \cdot 10^4$); проницаемая граница $BCDE'I$ – избыточное статическое давление $\Delta P_c = 0$; проницаемая граница EF , через которую транзитный поток выходит из канала – изменением избыточного давления ΔP_c моделируется нужное соотношение \bar{L}_0 ; $BG, B'G, IE, AF$ – твердые непроницаемые границы (ГУ – «стенка»).

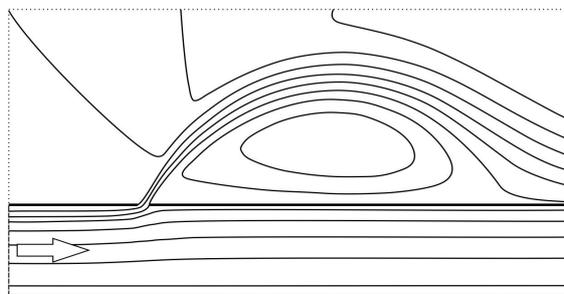


Рис. 2. Струя настигается на стенку

Картина течения, полученная с помощью пакета программ *Fluent* приведена на рис. 1. Здесь ширина отверстия $h = 0,015$ м, высота воздуховода $H = 0,1$ м, расход воздуха $L_0 = 0,15$ м³/с (соответственно $u_0 = 10$ м/с, $P_{до} = 61,3$ Па), транзитный удельный расход воздуха протекающего мимо отверстия $L_T = 1,35$ м³/с, общий удельный расход в стволе $L_c = L_0 + L_T = 1,5$ м³/с. Значения безразмерных параметров $\bar{h} = h/H = 0,15$, $L_0 = L_0/L_c = 0,1$. Эти параметры определяют не только значения коэффициентов m и n , но также и угол β на истечении, и коэффициенты потерь давления для потока, выходящего из отверстия ζ_0 и транзитного ζ_T .

На рис. 3 показаны поля относительных компонент скорости $\bar{u} = u/u_0$, и статического давления $\bar{p}_c = p_c/p_0$ на истечении ($p_d = \frac{\rho}{2} u_0^2$ – динамическое давление, определенное по средней скорости потока на истечении и плотности воздуха $\rho = 1,225$ кг/м³). Мы видим, что поля эти неравномерны, статическое давление заметно отличается от нуля и эти обстоятельства необходимо учитывать при определении J_0 .

Объединяя выражения (1), (9) и (2), (4), (9) получим:

$$m = \frac{\sqrt{\int_{-0,5}^{0,5} \left(\bar{u}_x^2 \cos b + \bar{u}_y^2 \sin b + \frac{\bar{p}_c}{2} \sin b \right) d\bar{x}}}{\sqrt[4]{\rho} \sqrt{c}}; \quad (10)$$

$$n = \frac{\sqrt{1 + Pr_T} \int_{-0,5}^{0,5} \Delta \bar{t} \bar{u} d\bar{x}}{\sqrt{\rho c} \sqrt{\int_{-0,5}^{0,5} \left(\bar{u}_x^2 \cos b + \bar{u}_y^2 \sin b + \frac{\bar{p}_c}{2} \sin b \right) d\bar{x}}}. \quad (11)$$

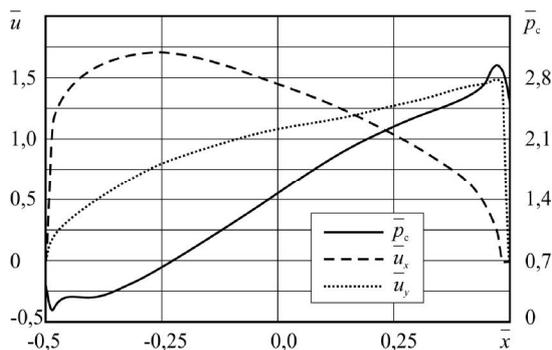


Рис. 3. Распределение статического давления \bar{p}_c и компонент скорости \bar{u} в отверстии при $\bar{L}_0=0,1$

Для значений параметров \bar{h} , \bar{L}_0 , имевших место в численном эксперименте $\beta=56,6^\circ$,
 $\int_{-0,5}^{0,5} \bar{u}_x d\bar{x} = 1,78$, $\int_{-0,5}^{0,5} \bar{u}_y^2 d\bar{x} = 1,12$, $\int_{-0,5}^{0,5} \frac{\bar{p}_c}{2} d\bar{x} = 0,72$, $\theta=2,52$.

Из формул (5-6) следует, что $c = \frac{\theta u_o^2 h}{u_{oc}^2 s \sqrt{\pi}}$. Вычисления показывают, что в нашем

случае $u_{oc}^2 s \approx \text{const}=26$. Тогда $c = \frac{2,52 \cdot 10^2 \cdot 0,015}{26 \cdot \sqrt{\pi}} = 0,082$; $m = \frac{\sqrt{\theta}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{c}} = \frac{\sqrt{2,52}}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{0,082}} = 4,16$.

Заметим, что для обычного щелевого отверстия с равномерным профилем скорости и отсутствием избыточного статического давления на истечении $m = 2,62$. Следовательно, рассматриваемая струя затухает заметно медленнее.

Значение c можно определить и из рассмотрения профилей продольной скорости u_x , которые приведены на рис. 4.

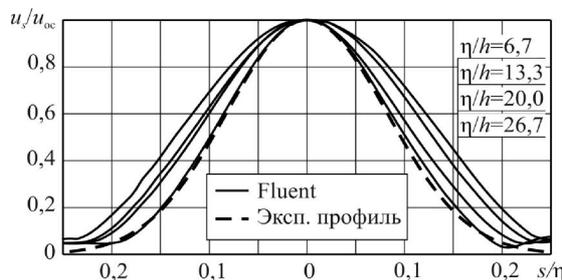
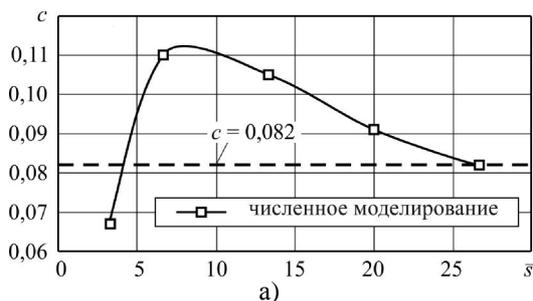


Рис. 4. Профили продольной скорости в сечениях струи

Штриховой линией здесь нанесен экспоненциальный профиль при $c = 0,082$:

$$\frac{u_x}{u_{oc}} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\eta}{cs} \right)^2}$$

Видно, что профили u_x в сечениях струи также близки к экспоненциальным, однако подобие профилей отсутствует. Это означает, что значение c по длине струи меняется (рис. 5 а).



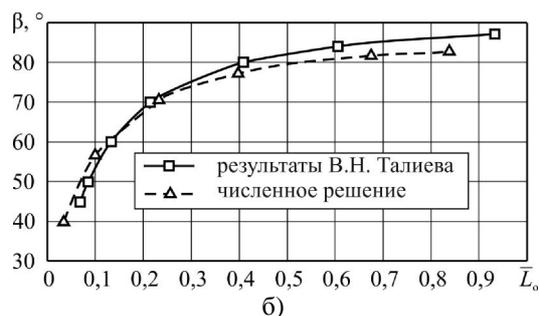


Рис. 5. Результаты расчетов:

а) изменение коэффициента c по длине струи; б) зависимость $\beta = \beta(\bar{L}_0)$ при $\bar{h} = 0,15$

Остановимся еще на проблеме теоретического определения угла β , который образует ось струи со стенкой воздуховода. Эту задачу в рамках допущений теории струй идеальной жидкости решали разные авторы [3, 10]. Конечно, такой подход не позволял определить кинематические характеристики струи, однако зависимость угла β от условий истечения \bar{h} , \bar{L}_0 была найдена. Приведем здесь результаты анализа В.Н. Талиева [3], который получил искомую связь в неявном виде:

$$\bar{h} = \frac{\cos b}{p(1-0,5\bar{L}_0)} \left\{ p\bar{L}_0 \cdot \sin b - \bar{L}_0 \cos b \cdot \ln \frac{1-\cos b}{1+\cos b} - 2 \left[(1-\bar{L}_0)a + \bar{L}_0 \cos b \right] \ln b + 2a(1-\bar{L}_0) \ln d \right\}. \quad (12)$$

Здесь

$$a = \frac{(1-0,5\bar{L}_0)^2 + (1-\bar{L}_0)^2 \cos^2 b}{2(1-0,5\bar{L}_0)(1-\bar{L}_0) \cos b}; \quad b = \frac{1-0,5\bar{L}_0 - \cos \beta}{1-0,5\bar{L}_0 + \cos \beta}; \quad d = \frac{1-0,5\bar{L}_0 - (1-\bar{L}_0) \cos b}{1-0,5\bar{L}_0 + (1-\bar{L}_0) \cos b}; \quad \bar{L}_0 < 1, \quad \bar{h} < 1.$$

Заметим, что значения комплексных b и c под знаком логарифма при некоторых сочетаниях значений параметра \bar{L}_0 и искомой переменной β могут быть отрицательными и в этих случаях формула (12) теряет смысл.

Значения β , определенные численно и по формулам В.Н. Талиева при $\bar{h} = 0,15$ весьма близки, что показывает рис. 5 б).

Заключение

Предлагаемый подход к расчетному определению кинематической и тепловой характеристик воздухораспределителей может служить приемлемой альтернативой трудоемкому, дорогостоящему и не всегда надежному физическому эксперименту. В рамках численного метода определяются и другие важные характеристики струи: направление истечения, коэффициенты местного сопротивления приточного отверстия на истечение и на проход; профили продольной скорости и избыточной температуры. Важными результатами проделанных вычислений являются установленные факты отсутствия подобия профилей продольной скорости в сечениях основного участка струи, наличие поля избыточного статического давления на истечении.

Все эти обстоятельства указывают на необходимость корректировки подходов к анализу турбулентных струйных течений.

Список библиографических ссылок

1. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : АВОК-ПРЕСС, 2008. 209 с.
2. Воздухораспределители компании «Арктос». Указания по расчету и практическому применению: методический материал / «Арктос», компания. 5-е изд. 2008. 215 с.
3. Бройда В. А., Посохин В. Н., Сафиуллин Р. Г. Вентиляция. М. : АСВ, 2015. 624 с.
4. 2013 ASHRAE Handbook-Fundamentals. SI edition. 2013. 1000 p.

5. Barringer M. Manufacturing Influences on Pressure Losses of Channel Fed Holes // J. Turbomach. 2013. Vol. 136, № 5. P. 51012-051012-10.
6. Hussain A., Ahmad Z., Ojha C. S. P. Analysis of flow through lateral rectangular orifices in open channels // Flow Meas. Instrum. Elsevier, 2014. Vol. 36. P. 32–35.
7. Hussain A., Ahmad Z., Ojha C. S. P. Flow through lateral circular orifice under free and submerged flow conditions // Flow Meas. Instrum. Elsevier, 2016. Vol. 52. P. 57–66.
8. Saito Y., Ikohagi T. Dividing and Combining Flows through Orifice Set on Side Wall of Square Duct // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B. 1994. Vol. 60, № 574. P. 1959–1964.
9. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Варсегова Е. В. К расчету потерь давления в местных сопротивлениях. Сообщение 3 // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 6. С. 58–65.
10. Посохин В. Н., Зиганшин А. М., Варсегова Е. В. О направлении истечения струи из отверстия в стенке воздуховода: сб. ст. Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции / ЧГУ, Чебоксары, 2016. С. 481–486.

Posokhin V.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: posohin@kgasu.ru

Ziganshin A.M. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: amziganshin@kgasu.ru

Varsegova E.V. – candidate of physical-mathematical sciences, associate professor

E-mail: evarsegova@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Numerical determination of the supply of air terminal characteristics

Abstract

Problem statement. In the calculation of air distribution data on the jet characteristics obtained experimentally are used. It is also considered that the distribution of the flow characteristics at the air nozzle outlet is equal or symmetrical, which is usually not the case. The methods of determining the kinematic and thermal coefficients of air nozzle outlets, based on the calculation of flow parameters using Fluent software are proposed. Methodology is illustrated in example of calculating the coefficients for the jet stream from slot orifice located in the wall of the duct among the other consistently placed slots. Taken into account the uneven velocity fields, static pressure, excess temperature in the supply orifice.

Results. Within the proposed methodology defined kinematic coefficient of air nozzle outlet, profiles of longitudinal velocity in the cross-section of the jet, as well as the angle which amounts with a duct forming the direction of the jet expiration. The facts of the absence of longitudinal velocity profiles similarity in the jet cross-sections in the main region of the jet, the presence of excess static pressure field on expiry are determined.

Conclusions. The computational definition of kinematic and thermal characteristics of the air terminals is possible. The results indicate the need to adjust the approaches to the analysis of turbulent jet flows.

Keywords: air nozzle outlet, kinematic and thermal coefficients, lateral orifice, the transit flow, the direction of the jet expiration, numerical method.

References

1. Posokhin V. N. Aerodynamics of ventilation. – M. : AVOK-PRESS, 2008. 209 p.
2. Air Terminal of «Arktos» company. Guidelines for the calculation and practical application: methodological material / «Arktos» company. 5th ed. 2008. 215 p.
3. Broida V. A., Posokhin V. N., Safiullin R. G. Ventilation. M. : ASV, 2015. 624 p.

4. Barringer M. Manufacturing Influences on Pressure Losses of Channel Fed Holes // J. Turbomach. 2013. Vol. 136, № 5. P. 51012-051012-10.
5. Hussain A., Ahmad Z., Ojha C. S. P. Analysis of flow through lateral rectangular orifices in open channels // Flow Meas. Instrum. Elsevier, 2014. Vol. 36. P. 32–35.
6. Hussain A., Ahmad Z., Ojha C. S. P. Flow through lateral circular orifice under free and submerged flow conditions // Flow Meas. Instrum. Elsevier, 2016. Vol. 52. P. 57–66.
7. Saito Y., Ikohagi T. Dividing and Combining Flows through Orifice Set on Side Wall of Square Duct // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B. 1994. Vol. 60, № 574. P. 1959–1964.
8. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Varsegova E. V. The calculation of the pressure losses in local resistances. Message 3 // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2016. № 6. P. 58–65.
9. 2013 ASHRAE Handbook-Fundamentals. SI edition. 2013. 1000 p.
10. Posokhin V. N., Ziganshin A. M., Varsegova E. V. About direction of flow from the outlet opening: dig. of art. New in architecture, design construction and renovation. The III International Conference (IX All-Russian Conference) / Chuvash state university, Cheboksary, 2016. P. 481–486.