

УДК 697.922

**Кареева Юлия Рустэмовна**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: jkareeva2503@gmail.com

**Варсегова Евгения Владиславовна**

кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: evgeniyav09@gmail.com

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

**Близнякова Ксения Андреевна**

инженер

E-mail: kseniabliznakova63@gmail.com

**ООО «Мак Инжиниринг»**

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 25/22

**Закиева Раушан Ринатовна**

инженер-стажер

E-mail: arh.art5@yandex.ru

**ООО «Проектная артель Анжелики Мелентьевой»**

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Солдатская, д. 8, оф. 11

## **Исследование влияния геометрических параметров приточного отверстия на характеристики струи**

### **Аннотация**

*Постановка задачи.* При выборе схемы воздухораспределения в помещениях с тепловыделениями наиболее эффективной является подача приточных струй непосредственно в рабочую зону. Для того, чтобы избежать неточности расчетов в результате проектирования необходимо учитывать неравномерность профилей скорости в струях, которые формируются при истечении из насадков различной геометрии и направления патрубка.

Однако практически не исследованными остаются истечения струй из насадков, расположенных непосредственно за поворотом, а также ориентированных под разными углами к горизонту.

Целью расчета является определение влияния расстояния от прямого поворота воздуховода до приточного отверстия на характеристики формирующейся струи. Неравномерность истечения исследуется численным методом с помощью программного комплекса Fluent.

*Результаты.* В результате численного решения построены линии тока течения для нескольких геометрий горизонтально расположенного насадка, а также определены основные характеристики струи на истечении: профили продольной и поперечной компоненты скорости, изменение статического давления, угла истечения струи. Результаты исследования представлены в безразмерном виде. Установлено, что на формирование поля скорости и давления в струе влияет взаимное расположения приточного насадка и предшествующего поворота. Получено, что при расположении приточного отверстия в непосредственной близости к повороту профили скорости имеют сильную неравномерность, а струя истекает под углом к горизонту. При удалении от поворота струя выравнивается, поперечная компонента скорости не оказывает влияние на струю, угол истечения стремится к горизонтальному.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при расчете воздухораспределения и циркуляции воздушных масс в вентилируемых помещениях.

**Ключевые слова:** численный метод, характеристики течения, приточный насадок, профиль скорости, вихревая зона.

**Для цитирования:** Кареева Ю. Р., Варсегова Е. В., Близнякова К. А., Закиева Р. Р. Исследование влияния геометрических параметров приточного отверстия на характеристики струи // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 104–111.

## 1. Введение

Исследованиям струйных течений в помещениях зданий различного назначения посвящено много работ. Известны работы, в которых рассматривается использование разных вариантов схем воздухораспределения в помещениях [1-4]. При выборе схемы воздухообмена в помещениях со значительными тепловыделениями зачастую предпочитают подачу приточных струй непосредственно в рабочую зону, например, системами воздушного душирования рабочих мест.

Известны экспериментальные и теоретические исследования, в которых определяются зависимости характеристик (ширина и дальность струи, профили продольной скорости, осевая скорость, средняя скорость обратного потока, расходы в сечении прямого и обратного потоков, распределение статического давления по длине струи) изотермических [5-8] и неизотермических [9-14] струйных течений от расположения приточных и вытяжных отверстий. Расчет характеристик движения воздушных масс в вентилируемых помещениях в указанных работах основывается на закономерностях струйных течений. При этом, как правило, используются закономерности свободных струй для расчета скорости  $u_{oc}$  (1) и избыточной температуры  $\Delta t_{oc}$  (2) на оси:

$$u_{oc} = \frac{mu_o \sqrt{h}}{\sqrt{s}}, \quad (1)$$

где  $m$  – кинематический коэффициент приточного отверстия (насадка),  $u_o$  – средняя по площади скорость истечения,  $h$  – ширина щели,  $s$  – расстояние до сечения, в котором определяются осевые характеристики струи;

$$\Delta t_{oc} = \frac{n\Delta t_o \sqrt{h}}{\sqrt{s}}, \quad (2)$$

где  $n$  – тепловой коэффициент приточного отверстия,  $\Delta t_o$  – температура на истечении.

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, что ведет к неточностям расчета в ряде случаев. Так часто мы имеем дело со струей, истекающей из отверстия конечного размера, геометрические характеристики которого оказывают значительное влияние на развитие струи в помещении. Кроме того, приточные отверстия в помещениях различного назначения могут быть расположены таким образом, что рабочая зона попадает в зону начального участка струи (область формирования струи), где определить основные характеристики по известным формулам уже невозможно. Единственно возможный способ – численное моделирование процесса истечения с помощью программ вычислительной гидродинамики (CFD).

В работе [15] исследуются характеристики струи, истекающей из последнего бокового отверстия. По ранее предложенной авторами методике определен кинематический коэффициент приточного насадка. Характеристики течения получены в программном комплексе Ansys Fluent.

Однако, практически нет работ по исследованию истечения струй из насадков, расположенных непосредственно за поворотом, а также ориентированных под разными углами к горизонту. В данной статье предпринята попытка численного исследования влияния расстояния от прямого поворота воздуховода до приточного отверстия на характеристики формирующейся струи.

Целью исследования является определение влияния расстояния от прямого поворота воздуховода до приточного отверстия на характеристики формирующейся струи.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- определение основных геометрических и кинематических характеристик на истечении из приточного отверстия и по длине струи;
- определение зависимости характера течения от места расположения выходного отверстия и поворота.

## 2. Материалы и методы

Рассматривается формирование плоских струй, истекающих из отверстий конечного размера  $CD$  ( $b_0$ ), расположенных на разном удалении  $ED$  ( $\bar{l}=l/b_0$ ) от предшествующего поворота на  $90^\circ$  (рис. 1).

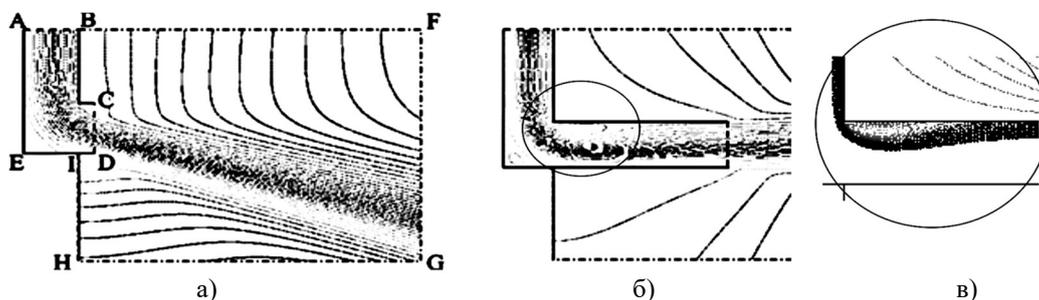


Рис. 1. Геометрия области течения. Линии тока при:  
а)  $\bar{l} = 1,25$ ; б)  $\bar{l} = 5,00$ ; в) вихревая зона после поворота (иллюстрации авторов)

Задача решается численно с помощью программного комплекса Fluent. Система дифференциальных уравнений турбулентного движения замыкается с помощью «стандартной»  $k-\varepsilon$  модели ( $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $\varepsilon$  – удельная диссипация турбулентной энергии). Для моделирования пограничного слоя вблизи непроницаемых поверхностей приняты пристеночные функции Standard Wall Function.

Граничные условия:

-  $AB$  (питающее отверстие) – Velocity inlet: скорость равномерна и направлена по нормали к границе:  $u_0 = const$ ;  $k = 0$ ;  $\varepsilon = 0$ ;

-  $BF, FG, GH, HI$  (свободные границы течения) – Pressure Outlet: избыточное давление  $\Delta p = 0$ ; скорость направлена по нормали к границе -  $\bar{u} = u_n$ ,  $\frac{dk}{dn} = 0$ ,  $\frac{d\varepsilon}{dn} = 0$ ;

-  $BC$  и  $AD$  (непроницаемые стенки) Wall:  $u = 0$ ,  $\frac{du_n}{dn} = 0$ ;

здесь  $\frac{d}{dn}$  – производные по нормали к границе.

Во всех численных экспериментах было принято: размер воздуховода постоянный и равен  $b_0 = 0,2$  м, скорость подачи на границе  $AB$  постоянная и равна  $u_0 = 3$ . Расстояние  $ED$  от поворота до плоскости истечения варьировалось:  $\bar{l} = l/b_0 = 1,25 \dots 5$ . Размер исследуемой области:  $BF = 2,7$  м,  $FG = 2$  м. Плотность приточного воздуха и воздуха в окружающем пространстве принята  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчетов представлены в безразмерном виде. В качестве масштабов приняты соответствующие характеристики струи на истечении:

$$\bar{u}_x = u_x/u_0; \bar{u}_y = u_y/u_0; \bar{P}_{st} = P_{st}/P_D.$$

В качестве линейного масштаба принята ширина воздуховода:

$$\bar{x} = x/b_0; \bar{y} = y/b_0.$$

## 3. Результаты и обсуждения

В результате численных расчетов получены линии тока течения (рис. 1). В случае, когда приточное отверстие находится максимально близко к повороту на расстоянии  $\bar{l} = 1,25-3,00$  (рис. 1а) вихревая зона (рис. 1в) поджимает струю и истечение происходит под углом  $\alpha$  к горизонту. По мере удаления приточного отверстия от поворота ( $\bar{l} > 3,0$ ) вихревая зона уже не оказывает такого влияния, истекающая струя начинает выравниваться по оси патрубка, угол истечения стремится к нулю (рис. 1б).

На рис. 2 показаны поля относительных компонент скорости  $\bar{u} = u/u_0$  и статического давления  $\bar{P}_{st} = P_{st}/P_D$  на границе истечения струи ( $P_D = \rho u_0^2/2$  – динамическое давление, определенное по средней скорости потока на истечении). Из рисунка видно, что полученные поля неравномерны, а статическое давление заметно отличается от нуля. Имеется область отрицательных значений, за счет чего в насадке создается разрежение, и возникает подтекание воздуха извне с образованием вихревых зон у верхней выходной кромки. Эти обстоятельства необходимо учитывать при расчете характеристик начального участка струи в случае расположения приточного отверстия сразу за поворотом.

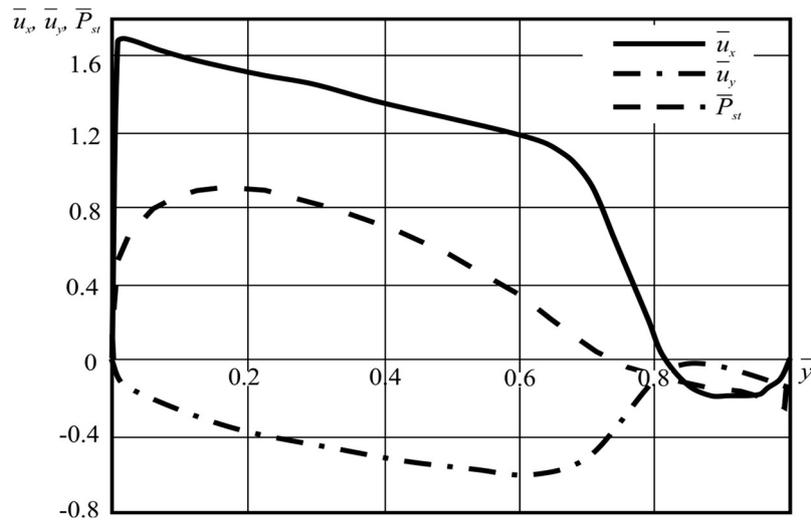


Рис. 2. Профили продольной  $\bar{u}_x$  и поперечной скоростей  $\bar{u}_y$ , давления  $\bar{P}_{st}$  при  $\bar{l} = 1,25$  (иллюстрация авторов)

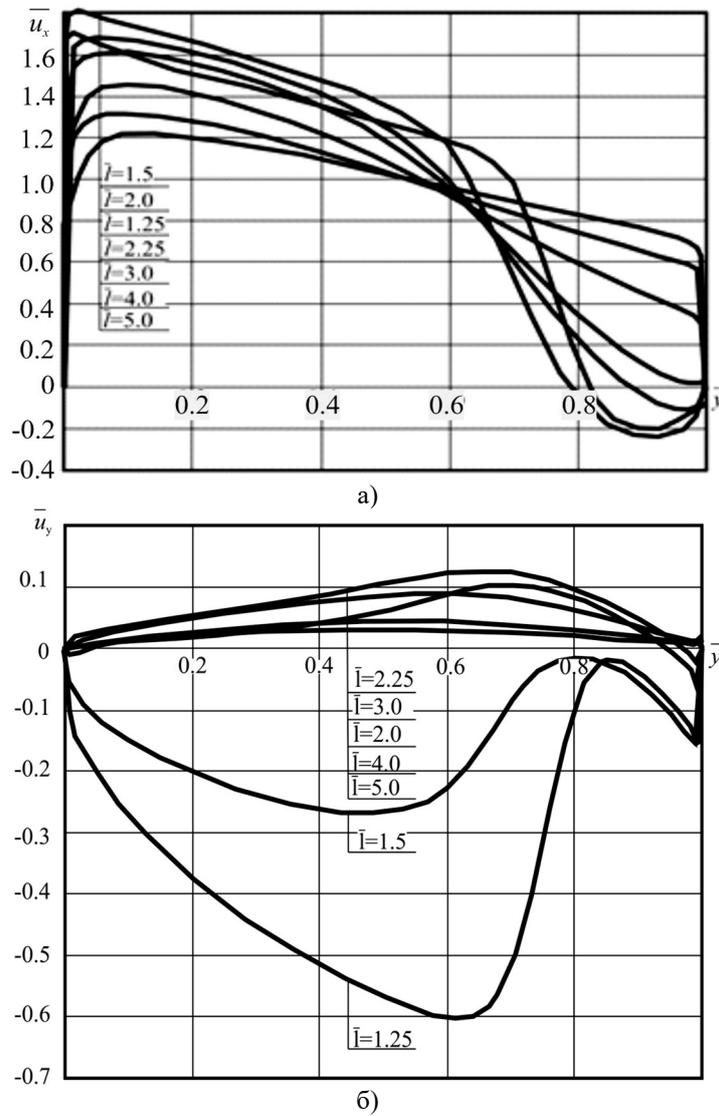


Рис. 3. Профили продольной компоненты скорости на истечении  $\bar{u}_x$  (а) и поперечной  $\bar{u}_y$  (б) (иллюстрация авторов)

Вне зависимости от длины участка после поворота, профиль продольной компоненты скоростиazole остается неравномерным (рис. 3а). Для  $\bar{l} > 3,0$  имеются области отрицательных значений скорости, что указывает на наличие вихревых зон в этой части приточного насадка. При удалении от поворота поток в насадке выравнивается, и профиль скорости на истечении становится более равномерным.

На рис. 3б приведено изменение поперечной компоненты скорости на истечении  $\bar{u}_y$ . Близкое расположение приточного отверстия к повороту сильно влияет на изменение поперечной компоненты скорости  $\bar{u}_y$ . При  $\bar{l} < 2,25$  значения продольной и поперечной компоненты скорости соизмеримы. То есть, при определении характеристик струи важно учитывать обе компоненты. На большем удалении от поворота значение  $\bar{u}_y$  стремится к 0. При  $\bar{l} > 3,0$  поперечной компонентой скорости можно пренебречь.

По полученным максимальным значениям скорости в струе была построена ось струи и определен угол истечения – угол отклонения оси струи от горизонтали, для всех вариантов расположения приточного отверстия относительно поворота (табл.).

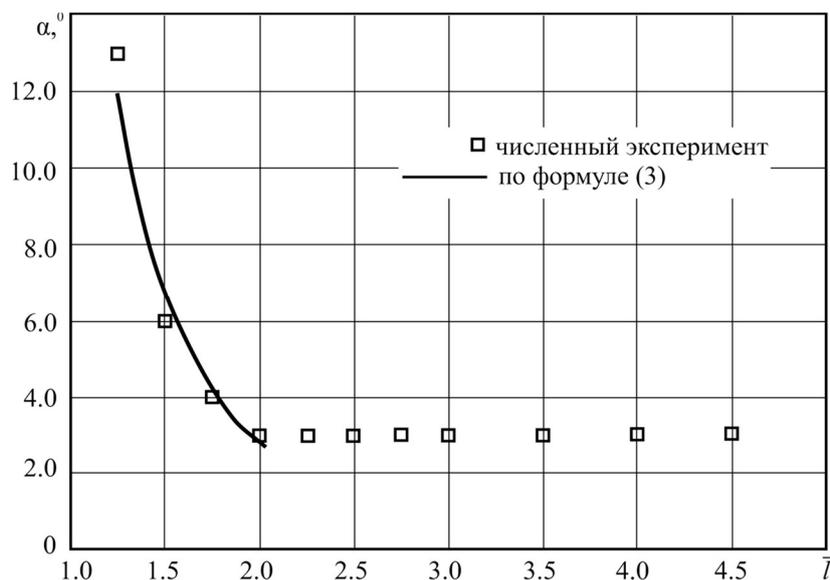
Таблица

$l, \text{ м}$	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9
$\alpha, ^\circ$	13	6	4	3	3	3	3	3	3	3	3

В диапазоне размеров  $\bar{l} < 2,0$  зависимость  $\alpha = \alpha(\bar{l})$  достаточно хорошо описывается степенной функцией:

$$\alpha = 23,834 \bar{l}^{-3,106}. \quad (3)$$

Точками на рис. 4 показаны значения, полученные в результате численного эксперимента, сплошной линией – зависимость значения отклонения оси струи от длины участка после поворота, определенная по формуле 3. Отклонение результатов, полученных численно и аналитически, не превышает 10 %.

Рис. 4. Зависимость угла истечения  $\alpha$  от расстояния  $\bar{l}$  (иллюстрация авторов)

При малых значениях длины  $\bar{l}$ , как было уже сказано ранее, угол заметно влияет на характеристики струи на истечении. Из-за отрицательных значений статического давления в насадке возникает подтекание воздуха извне с образованием вихревых зон у верхней выходной кромки. Воздух, подтекающий из окружающего пространства, поджимает струю, за счет чего она сильно отклоняется от горизонтали. В этих случаях, как было показано ранее, поперечная компонента имеет максимальные значения и соизмерима с продольной. При удалении истечения от поворота компонента скорости  $\bar{u}_y$  стремится к 0, струя выпрямляется по сечению воздуховода и угол истечения стремится к 0.

#### 4. Заключение

1. Численным методом решена задача об истечении струи из отверстия, расположенного на разном удалении от поворота.

2. В результате исследования получены основные геометрические и кинематические характеристики на истечении из приточного отверстия и по длине струи.

3. Определено, что характер течения имеет сильную зависимость от места расположения выходного отверстия и поворота. При истечении струи из приточного отверстия, расположенного в непосредственной близости к повороту, струя сильно деформируется.

4. Выявлено, что из-за возникающей после поворота вихревой зоны, которая поджимает струю, истечение происходит под определенным углом. Профили продольной и поперечной скорости в этом случае соизмеримы, статическое давление не равно нулю.

5. Перечисленные факторы необходимо учитывать при определении характеристик воздушных струй, направляемых в рабочую зону помещений.

#### Список библиографических ссылок

1. Chen H. Experimental and numerical investigations of a ventilation strategy – impinging jet ventilation for an office environment. Doctoral thesis Linköping University, The Institute of Technology, Published in Sweden. 2014. DOI: 10.3384/diss.diva-106483.
2. Ren Sh., Tian Sh., Meng X. Comparison of Displacement Ventilation, Mixing Ventilation and Underfloor Air Distribution System : dig. of art. International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering / Guangzhou, 2015, November. P. 79–82. DOI: 10.2991/icahe-15.2015.16.
3. Janbakhsh S., Moshfegh B. Numerical investigation of ventilation performance of different air supply devices in an office environment // Building and Environment. 2015. Vol. 90. P. 37–50. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.03.021.
4. Fillingham P., Novosselov I. Similarity of the Wall Jet Resulting from Planar Underexpanded Impinging Jets // AXiv preprint. 2018. arXiv:1812. P. 11220.
5. Abramovich G. The theory of turbulent jets. MIT Press, Cambridge, MA. 1963. DOI: 10.7551/mitpress/6781.001.0001.
6. Zou Y. Velocity Decay in Air Jets for HVAC Applications // ASHRAE Transactions. 2000. Vol. 106. P. 2.
7. Zaslomova M., Ivanov N. Numerical Simulation of Air Distribution in a Room with a Sidewall Jet under Benchmark Test Conditions : dig. of art. The eighth polyakhov's reading : «Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics» 1959 (1) 050033 / Saint Petersburg, 2018, May. DOI: 10.1063/1.5034661.
8. Malmstrom T-G., Zou Y. Influence of outlet characteristics on free axial air jets. Roomvent : dig. of art. Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference 2000.
9. Kareeva Y. R., Posokhin V. N., Safiullin R. G., Bliznyakova K. A. Study of air jet characteristics in air-conditioned rooms : dig. of art. MATEC Web of Conferences (324) 2020. DOI: 10.1051/mateconf/202032403009.
10. Bing-Chen Wang F., Koupriyanov M., Tully B. Experimental study of a non-isothermal wall jet issued by a displacement ventilation system // Building and Environment. 2013. Vol. 66. P. 131–140.
11. Ito K., Inthavong K., Kurabuchi T., Ueda T., Endo T., Omori T., Ono H., Kato Sh., Sakai K., Suwa Y., Matsumoto H., Yoshino H., Zhang W., Tu J. CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 1. Isothermal / Non-Isothermal Flow in 2D and 3D Room Model // International Journal of Architectural Engineering Technology. 2015. Vol. 2. P. 1–22.
12. Ahn H., Rim D., Lo J. Ventilation and energy performance of partitioned indoor spaces under mixing and displacement ventilation // Building Simulation. 2017. Vol. 11. DOI: 10.1007/s12273-017-0410-z.
13. Tomasi R., Krajčič M., Simone A., Olesen B. W. Experimental evaluation of air distribution in mechanically ventilated residential rooms: Thermal comfort and ventilation effectiveness // Energy and Buildings. 2013. Vol. 60. P. 28–37. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.003.

14. Nielsen P. V. Fifty years of CFD for room air distribution // Building and Environment. 2015. Vol. 91. P. 78–90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035.
15. Зиганшин А. М., Батрова К. Э., Гимадиева Г. А. Численное определение характеристик течения через последнее боковое отверстие в воздуховоде // Известия вузов. Строительство. 2018. № 7. С. 53–65.

**Kareeva Juliya Rustemovna**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: jkareeva2503@gmail.com

**Varsegova Evgenia Vladislavovna**

candidate of physical-mathematical sciences, associate professor

E-mail: evgeniyav09@gmail.com

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

**Bliznyakova Ksenia Andreevna**

engineer

E-mail: kseniabliznakova63@gmail.com

**LLC «Mak Engineering»**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Kremlevskaya st., 25/22

**Zakieva Raushan Rinatovna**

engineer

E-mail: arh.art5@yandex.ru

**LLC «Project artel of Angelika Melentieva»**

The organization address: 420066, Russia, Kazan, Soldatskaya st., 8, of. 11

**Research of the geometrical parameters of air inlet hole influence  
on the characteristics of jet****Abstract**

*Problem statement.* While considering the air exchange scheme in the room with heat release the most effective is the air-jet supplying directly into the working area. To avoid inaccuracies in the design calculations, it is necessary to ensure the irregularity of the velocity profiles in the jets, which are formed from the outflows from the nozzles of different geometry and direction of the branch pipe.

However, the outflows of jets from the nozzles located immediately behind the direct turn and oriented at different angles to the horizon, remain practically unexplored.

The purpose of the calculation is to determine the influence of the distance from the direct turn of the air duct to the inlet on the characteristics of the forming jet. Outflow irregularity is investigated numerically using the Fluent software package.

*Results.* As a result of the numerical solution, the flow streamlines were constructed for several geometries of a horizontally located nozzle, and the main characteristics of the jet at the outlet were determined: the profiles of the longitudinal and transverse components of the velocity, the change in static pressure, and the angle of the jet outflow. The research results are presented in dimensionless form. It was found that the formation of the velocity and pressure field in the jet is influenced by the relative position of the supply nozzle and the previous rotation. It was found that when the inlet is located in the immediate vicinity of the turn, the velocity profiles have a strong unevenness, and the jet flows out at an angle to the horizon. When moving away from the turn, the jet is leveled, the transverse velocity component does not affect the jet, and the outflow angle tends to horizontal.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that they can be used to calculate the air distribution and circulation of air masses in ventilated rooms.

**Keywords:** numerical methods, flow characteristics, velocity profile, vortex zone, computational fluid dynamics.

**For citation:** Kareeva Ju. R., Varsegova E. V., Ksenia B. A., Raushan Z. R. Research of the geometrical parameters of air inlet hole influence on the characteristics of jet // *Izvestija KGASU*. 2020. № 4 (54). P. 104–111.

### References

1. Chen H. Experimental and numerical investigations of a ventilation strategy – impinging jet ventilation for an office environment. Doctoral thesis Linköping University, The Institute of Technology, Published in Sweden. 2014. DOI: 10.3384/diss.diva-106483.
2. Ren Sh., Tian Sh., Meng X. Comparison of Displacement Ventilation, Mixing Ventilation and Underfloor Air Distribution System : dig. of art. International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering / Guangzhou, 2015, November. P. 79–82. DOI: 10.2991/icache-15.2015.16.
3. Janbakhsh S., Moshfegh B. Numerical investigation of ventilation performance of different air supply devices in an office environment // *Building and Environment*. 2015. Vol. 90. P. 37–50. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.03.021.
4. Fillingham P., Novosselov I. Similarity of the Wall Jet Resulting from Planar Underexpanded Impinging Jets // *AXiv preprint*. 2018. arXiv:1812. P. 11220.
5. Abramovich G. The theory of turbulent jets. MIT Press, Cambridge, MA. 1963. DOI: 10.7551/mitpress/6781.001.0001.
6. Zou Y. Velocity Decay in Air Jets for HVAC Applications // *ASHRAE Transactions*. 2000. Vol. 106. P. 2.
7. Zasimova M., Ivanov N. Numerical Simulation of Air Distribution in a Room with a Sidewall Jet under Benchmark Test Conditions : dig. of art. The eighth polyakhov's reading : «Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics» 1959 (1) 050033 / Saint Petersburg, 2018, May. DOI: 10.1063/1.5034661.
8. Malmstrom T-G., Zou Y. Influence of outlet characteristics on free axial air jets. Roomvent : dig. of art. Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference 2000.
9. Kareeva Y. R., Posokhin V. N., Safiullin R. G., Bliznyakova K. A. Study of air jet characteristics in air-conditioned rooms : dig. of art. MATEC Web of Conferences (324) 2020. DOI: 10.1051/mateconf/202032403009.
10. Bing-Chen Wang F., Koupriyanov M., Tully B. Experimental study of a non-isothermal wall jet issued by a displacement ventilation system // *Building and Environment*. 2013. Vol. 66. P. 131–140.
11. Ito K., Inthavong K., Kurabuchi T., Ueda T., Endo T., Omori T., Ono H., Kato Sh., Sakai K., Suwa Y., Matsumoto H., Yoshino H., Zhang W., Tu J. CFD Benchmark Tests for Indoor Environmental Problems: Part 1. Isothermal / Non-Isothermal Flow in 2D and 3D Room Model // *International Journal of Architectural Engineering Technology*. 2015. Vol. 2. P. 1–22.
12. Ahn H., Rim D., Lo J. Ventilation and energy performance of partitioned indoor spaces under mixing and displacement ventilation // *Building Simulation*. 2017. Vol. 11. DOI: 10.1007/s12273-017-0410-z.
13. Tomasi R., Krajčák M., Simone A., Olesen B. W. Experimental evaluation of air distribution in mechanically ventilated residential rooms: Thermal comfort and ventilation effectiveness // *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 60. P. 28–37. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.003.
14. Nielsen P. V. Fifty years of CFD for room air distribution // *Building and Environment*. 2015. Vol. 91. P. 78–90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035.
15. Ziganshin A. M., Batrova K. E., Gimadieva G. A. Numerical determination of flow characteristics through the last lateral opening in the air duct // *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2018. № 7. P. 53–65.