



УДК 697.922

Кареева Юлия Рустэмовна

кандидат технических наук, доцент

Email: jkareeva2503@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Закиева Раушан Ринатовна

Инженер-проектировщик

Email: Raushan.zakieva@gmail.com

ООО «Архитектурное бюро АБ-1»

Адрес организации: 420087, Россия, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, д. 118

Верификация численной модели процесса истечения струи из приточного отверстия под углом

Аннотация

Постановка задачи. Одним из главных этапов проектирования систем вентиляции и кондиционирования в здании является расчет воздухораспределения в помещениях. Энергетическая и экономическая эффективность подобранных систем вентиляции и кондиционирования напрямую зависят от точности и правильности расчетов воздухораспределения в помещениях.

Изменяя угол подачи, можно обеспечить необходимые параметры микроклимата, не используя дополнительное оборудование, и тем самым оптимизировать затраты на вентиляцию и кондиционирование.

Целью работы является верификация численной модели процесса истечения воздушной струи, истекающей под углом 45 градусов к горизонту в вентилируемое помещение, и определение зависимости характеристик струи от расположения приточного отверстия за поворотом. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи: провести исследование численным методом струйного течения из приточного отверстия, расположенного при разном удалении от поворота воздуховода на 45°, а также определить закономерности изменения геометрических и кинематических характеристик струи в зависимости от расстояния между поворотом воздуховода и приточным отверстием.

Результаты. В результате исследования была выбрана численная модель процессов струйного течения воздуха или воздушных масс из приточных отверстий, расположенных на разном удалении от поворота. Получено распределение давлений в сечении на истечении струи и скоростей по длине струи.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в рассмотрении возможности использования численной модели процесса истечения воздушной струи под углом при расчете воздухораспределения и повышения эффективности циркуляции воздушных масс в помещениях различного назначения.

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

Для цитирования: Кареева Ю. Р., Закиева Р. Р. Верификация численной модели процесса истечения струи из приточного отверстия под углом // Известия КГАСУ. 2021. 4 (58). С. 82-89. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_82.

1. Введение

Энергетическая и экономическая эффективность систем вентиляции и кондиционирования в здании напрямую зависят от рационального выбора схемы воздухораспределения в помещениях и выбора характеристик приточных струй. Это особенно важно в помещениях с повышенными тепловыделениями, где зачастую приточные струи направляют непосредственно в рабочую зону вблизи рабочих мест. При таком способе подачи скорость воздуха на истечении должна быть близка к нормируемой, что приводит к использованию воздухораспределителей неприемлемо

больших размеров. Для снижения скорости струи закручивают, используя завихрители разных типов (шнеки, лопаточные конструкции, закручивание с помощью тангенциального подвода воздуха). Такие устройства отличаются энергоемкостью и повышенным уровнем шума. С другой стороны, подавая воздух в рабочую зону наклонными струями и изменяя угол подачи, можно обеспечить необходимые кинематические параметры приточной струи, не используя дополнительное оборудование, и, тем самым, оптимизировать затраты на вентиляцию и кондиционирование.

Влияния геометрических и кинематических параметров приточной струи на воздухораспределение в помещениях различного назначения является актуальной проблемой и ей посвящено много работ. В работах [1-6] приводятся результаты численного эксперимента, полученного с помощью программного комплекса Ansys Fluent. Рассматривается выбор численной модели для различных случаев воздухораспределения [2-7]. Подробно исследована схема «сверху вниз» в плоской и пространственной постановке [8-13]. Авторами в статьях [14-16] проведен ряд по исследованию вихревых зон и определению коэффициента местного сопротивления (КМС) вытяжных отверстий. Выявлено, что при наличии возмущающих элементов в вентиляционной системе, образующиеся вихри закручивают поток по часовой стрелке. Это приводит к уменьшению угла подачи, отрыву потока от стенок с последующим образованием вихревых застойных областей, которые значительно уменьшают живое сечение потока и увеличивают потери давления в подающем элементе.

В работе [17] представлены результаты исследования характеристик струи, формируемой приточным отверстием после поворота воздуховода на 90 градусов. Были получены геометрические и кинематические характеристики струи в зависимости от удаления от поворота и геометрии приточного отверстия. Полученные результаты показывают, что в реальных ситуациях условия подтекания к воздухораспределителю и неравномерность поля скорости существенно влияют на характеристики струи и зачастую сложно получить струю с ожидаемыми характеристиками. Кроме того, значение кинематического коэффициента для многих геометрически сложных воздухораспределителей не является константой по длине основного участка струи [2], поэтому возникает необходимость учитывать неравномерность профилей скоростей в струях, которые формируются при истечении из патрубков с различной геометрией и направлением выхода струи. Например, при ограниченном пространстве в помещении воздух в рабочую зону бывает необходимо подавать под углами, отличными от прямого.

Целью работы является верификация численной модели процесса истечения воздушной струи, истекающей под углом 45 градусов к горизонту в вентилируемое помещение, и определение зависимости характеристик струи от расположения приточного отверстия за поворотом. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- провести численным методом исследование струйного течения из приточного отверстия, расположенного при разном удалении от поворота воздуховода на 45°;
- определить закономерности изменения геометрических и кинематических характеристик струи в зависимости от расстояния между поворотом воздуховода и приточным отверстием.

2. Материалы и методы.

Рассматривается задача истечения струи из приточного щелевого отверстия, расположенного на расстоянии l за косым коленом под углом в 45° к горизонту.

В препроцессоре Gambit по заданным координатам создана геометрия исследуемой области (рис. 1). Во всех численных экспериментах было принято: течение воздуха происходит по воздуховоду постоянного сечения, равного 0.2 м со скоростью на границе АВ $u_0 = 3$ м/с. Расстояние от поворота до плоскости истечения варьировалось от 0,1 до 0,4 м. Задача рассматривается в изотермической постановке, плотность воздуха принималась постоянной $\rho = 1,225$ кг/м³.

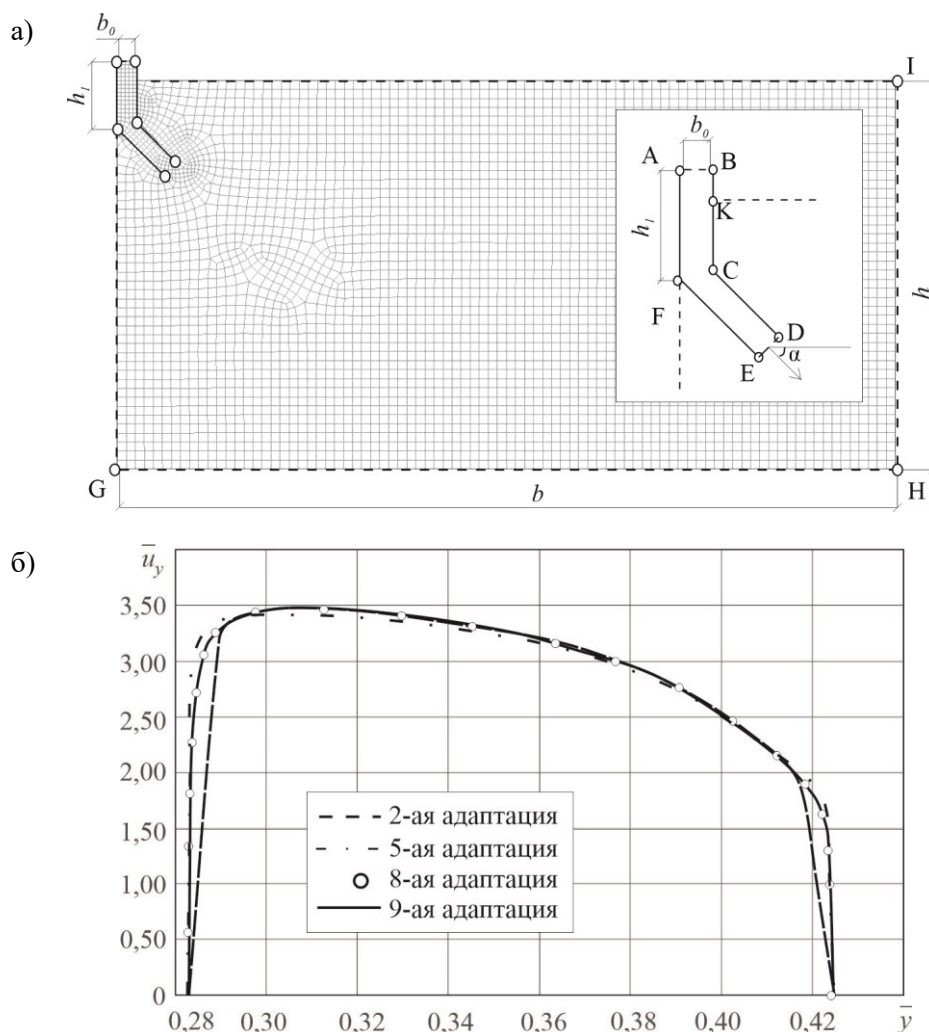


Рис. 1. – Характеристики задачи: а) геометрия расчетной области и расчетная сетка; б) сеточная зависимость при $l = 0,1$ (иллюстрации авторов)

Граничные условия, принятые в задаче:

- на AB (подача воздуха) – Velocity inlet: скорость постоянная и направлена по нормали к границе: $u_0 = \text{const}$; $k=0$; $\varepsilon=0$;
- на FG , GH , HI , IK (свободная граница) – Pressure Outlet: избыточное давление $\Delta p=0$; скорость направлена по нормали к границе - $\bar{u} = u_n$, $dk/dn=0$, $d\varepsilon/dn=0$;
- на AF , FE , BC и CD (непроницаемые стенки) Wall: $u = 0$, $du_n/dn=0$; (dn - нормаль к границе).

При расчете течений в двухмерной версии программы *Fluent* используется стандартная *k-epsilon* модель турбулентности со стандартными пристеночными функциями – Standard Wall Functions (SWF).

Для получения более точного решения необходимо было измельчить сетку таким образом, чтобы величина ячеек не оказывала влияние на исследуемые характеристики. На рис. 1б приведен график сеточной зависимости, где $\bar{u}_y = u_y / u_0$, $\bar{y} = y / b_0$. Измельчение сетки было выполнено 4 раза по всей области, затем - только вдоль твердых границ. На графике показано, как изменяется продольная компонента скорости в задачах с разными размерами ячеек сетки. Можно видеть, как влияет величина сетки на получаемые данные. Добившись того, что сетка перестала влиять на результаты, был получен минимальный размер ячеек $2,67 \cdot 10^{-8}$. Во всех задачах выбиралась такая же мелкость сетки.

В результате численного решения были получены основные геометрические и кинематические характеристики струи, истекающей из отверстия, расположенного за поворотом на 45 градусов.

3. Результаты и обсуждения

На рисунках 2 представлены линии тока течения, полученные в результате численных расчетов.

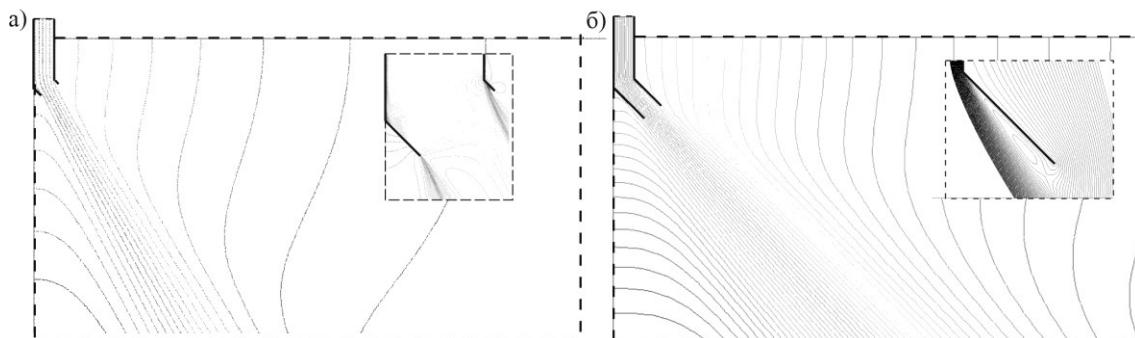


Рис. 2. – Линии тока при длине приточного патрубка: а) 0,1 м, б) 0,4 м.
(иллюстрации авторов)

В первом случае (рис. 2а) приточное отверстие находится максимально близко к повороту на расстоянии $\bar{l} = 0,1$ м. На рис. 2б это расстояние значительно больше, и составляет $\bar{l} = 0,4$. Картины течения свидетельствуют о том, что при небольшом удалении места истечения от поворота за ним образуется вихревая зона, которая поджимает струю и истечение происходит под некоторым углом к горизонту. По мере удаления приточного отверстия от поворота ($\bar{l} > 0,2$) истекающая струя начинает выравниваться по оси патрубка, угол истечения стремится к нулю.

Кроме того, на рис. 2 в укрупненном масштабе показаны зоны вихрей, образующиеся после поворота. Из рисунка видно, что при минимальном значении l происходит подтекание воздуха из окружающего пространства, вследствие чего уменьшается живое сечение струи на истечении. При большой длине l подтекания извне не происходит.

На рис. 3 представлены безразмерные профили статического давления $\bar{P}_{st} = \frac{P_{st}}{(\rho v^2 / 2)}$ на истечении в зависимости от безразмерного параметра $\bar{y}$.

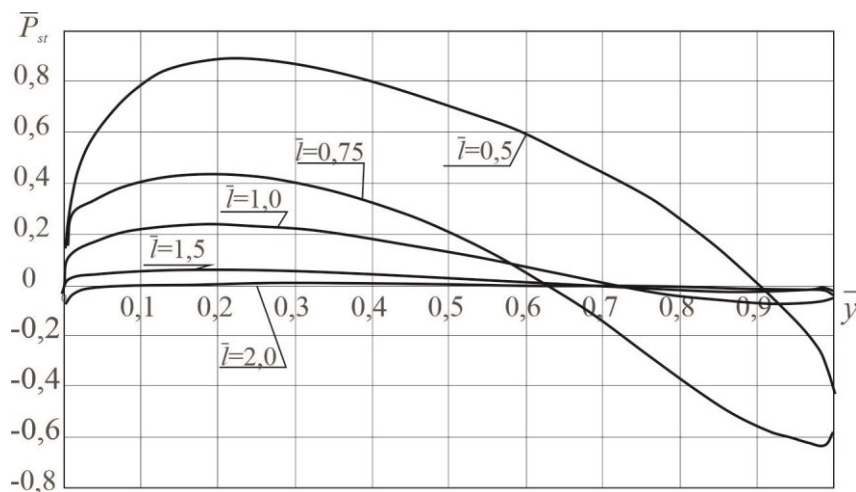


Рис. 3. – Профили статического давления $\bar{P}_{st}$ в струе при разных $\bar{l}$ (иллюстрации авторов)

Анализ графика показывает, что за поворотом на 45 градусов в пределах патрубка образуются критические зоны, где давление у стенок достигает отрицательных значений. За счёт этого происходит подсасывание воздуха из окружающего пространства на выходе из приточного отверстия, что приводит к образованию вихрей.

Ранее в работе [18] были представлены графики изменения скорости струи в сечении на истечении из приточного отверстия, расположенного после поворота 45°. На рис. 4 показан график изменения безразмерной средней скорости на оси струи $\bar{u}_m$ при удалении от поворота $\bar{l} = 0,75$, полученный в результате численных экспериментов. Для верификации численной модели процесса струйного течения на график нанесены результаты расчета, полученные по формуле:

$$u_m = \frac{m u_o \sqrt{b_0}}{\sqrt{\eta}}, \quad (1)$$

где $\eta = x \cdot \cos \alpha$ – безразмерное расстояние от центра истечения по оси струи.

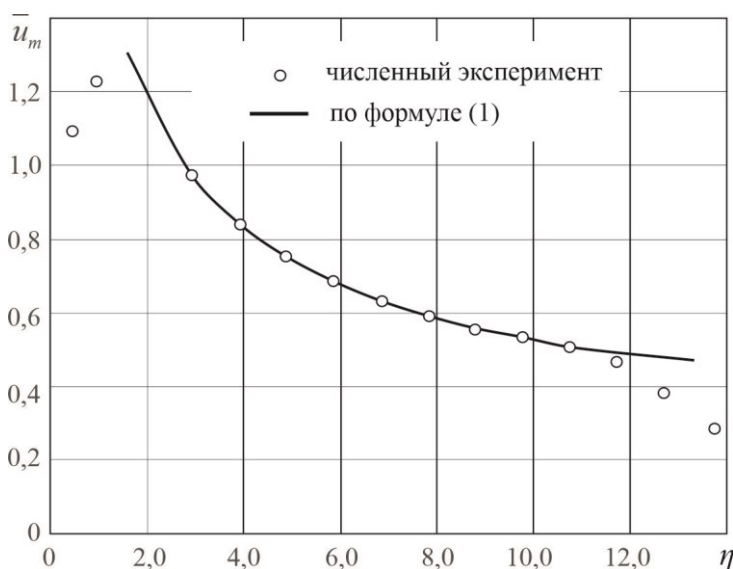


Рис. 4. – Средняя скорость на оси струи при длине патрубка $\bar{l} = 0,75$ (иллюстрации авторов)

Численное исследование показывает, что расстояние до истечения влияет на деформацию струи в обратной зависимости. Так, при истечении из выходного отверстия под углом 45°, но при малой длине патрубка $\bar{l} = 0,5$ м, струя сильно деформируется и приобретает угол в 58°. Это происходит из-за образования вихрей пониженной и повышенной скорости в углах выходного отверстия, что отрицательно сказывается на площади, охватываемой воздухораспределителем, и снижает эффективность установки.

Установлено, что при угле истечения 45 градусов оптимальной является длина патрубка $\bar{l} = 1,0$ м. Это связано с тем, что струя при такой длине патрубка практически не меняет своего направления, а влияние вихрей в патрубке практически отсутствует. Струя из выходного отверстия воздухораспределителя выпрямляется и поступает в помещение без существенного изменения направления скорости.

Дальнейшее исследование будет направлено на нахождение оптимального угла воздухораспределителя, на изучение влияния встречных потоков, на выявление наиболее экономически выгодной и эффективной установки воздухораспределителей с учетом всех влияющих факторов.

4. Заключение

Выполнена верификация численной модели процесса истечения струи из приточного отверстия, расположенного за поворотом, подобраны граничные условия, модель турбулентности, геометрия и сетка исследуемой области. Установлено, что

выбранная численная модель процесса может быть использована для дальнейшего исследования нахождение оптимального угла воздухораспределителя.

Выявлены закономерности течения при разном удалении приточного отверстия от поворота на 45 градусов, которые обусловлены наличием отрицательного статического давления у стенок и сильной деформацией струи при небольшом удалении места истечения от поворота.

По полученным геометрическим и кинематическим характеристикам струи определена оптимальная длина патрубка, при котором увеличивается зона, обслуживаемая воздушным потоком, и повышается эффективность циркуляции воздушных масс в помещениях различного назначения.

Список библиографических ссылок

1. Shopayeva A., Safiullin R. CFD-modeling of flow in confluence nodes of ventilation units of multi-storey buildings: dig. of art. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012157>.
2. Кочарьянц, К. В. Численное моделирование воздухораспределения веерными настилающимися струями. Выбор модели турбулентности / К. В. Кочарьянц // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 4(57). – С. 128-133.
3. Naumov A.L., Kapko D.V., Brodach M.M. Ventilation systems with local recirculation diffusers // Energy Build. 85.2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.050>.
4. Ivanov N.G., Zasimova M.A. Large eddy simulation of airflow in a test ventilated room // J.Phys. Conf. Ser. **1038**, 12136. 2018.
5. Zasimova M.A., Ivanov N.G., Markov D. Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D sidewall JET. I. Foundations for eddy-resolving approach application based on periodical formulation. // St. Petersburg. State Polytech. Univ. J. Phys. Math. **13**. 2020. <https://doi.org/10.18721/JPM.13305>
6. Zasimova M.A., Ivanov N.G., Markov D: Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D Sidewall JET. II. LES-computations for the room with finite width. // St. Petersburg. State Polytech. Univ. J. Phys. Math. **13** (2020). <https://doi.org/10.18721/JPM.13306>
7. Ricci A., Kalkman I., Blocken B., Burlando M., Repetto M.P. Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment. // Build. Environ. **171**. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106617>
8. Nguyen Ch.K., David D., Kuznik Fr. Full-scale experimental study of ceiling turbulent air jets in mechanically ventilated rooms. 2017.
9. Xie H., Zhang S., Guan X. Shanghai Ligong Daxue Xuebao // J.Univ. Shanghai Sci. Technol. **39**, 81. 2017. <https://doi.org/10.13255/j.cnki.jusst.2017.01.014>.
10. Teodosiu C., Ilie V., Teodosiu R. Appropriate CFD turbulence model for improving indoor air quality of ventilated spaces. // Math. Model. Civil Eng. **10**, 28. 2015. <https://doi.org/10.2478/mmce-2014-0020>.
11. Mularski J., Arora A., Saeed M.A., Nied'zwiecki Ł., Saeidi S. Impact of turbulence models on the air flow in a confined rectangular space. // Eng. Sci. Technol. 2020. <https://doi.org/10.37256/est.212021627>
12. Teodosiu R., Niculi, t̃a L., Teodosiu C. Computational fluid dynamics based modeling of a linear heat source. // Environ. Eng. Manag. J. **13**. 2014. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.216>.
13. Tabunshchikov Y.A., Shkarpet V.E., Kapko D.V., Brodach M.M., Kochariante K.V. Installing local recirculation air diffusers during building deep renovation reduces energy consumption of ventilation systems. // Energy Procedia. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.149>.
14. Ziganshin A.M., Batrova K.E., Logachev K.I., Mingazeeva D.N. Numerical modelling of energy efficient exhaust orifices and hoods in ventilation and air conditioning systems in buildings and facilities of thermal power plants: dig. of art. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. (2019). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012134>

15. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Gol'tsov A.B. Reducing power consumption of local exhaust ventilation systems. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042015>
16. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Logachev A.K. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods. // Energy Build. **173**. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>
17. Kareeva J., Bliznyakova K., Ashadullina D., Zakieva R.: Influence of geometrical parameters of air inlet hole on the kinematic characteristics of jet: dig. of art. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012164>
18. Kareeva, J., Bliznyakova, K., Zakieva, R.: Numerical Study of the Influence of the Inlet Geometric Parameters on the Jet Characteristics: dig. of art. STCCE 2021, LNCE 169, pp. 364–371, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80103-8_39

Kareeva Juliya Rustemovna

candidate of technical sciences, associate professor

Email: jkareeva2503@gmail.com

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Zakieva Raushan Rinatovna

engineer-designer

Email: Raushan.zakieva@gmail.com

ООО «Architectural Bureau AB-1»

The organization address: 420087, Russia, Kazan, Adel Kutuya st., 118

Verification of the numerical model of the process of jet outflow from the inlet at an angle**Abstract**

Problem statement. One of the main stages in the design of ventilation and air conditioning systems in a building is the calculation of air distribution in the premises. The energy and economic efficiency of the selected ventilation and air conditioning systems directly depend on the accuracy and correctness of calculations of air distribution in the premises.

By changing the feed angle, it is possible to provide the necessary microclimate parameters without using additional equipment, and thereby optimize the costs of ventilation and air conditioning.

The aim of the work is to verify the numerical model of the process of the outflow of an air stream flowing out at an angle of 45 degrees to the horizon into a ventilated room, and to determine the dependence of the characteristics of the stream on the location of the inlet behind the bend. To achieve this goal, the following tasks have been identified: to carry out a numerical study of the jet flow from the inlet, located at different distances from the rotation of the air duct by 45 degrees, and also to determine the patterns of change in the geometric and kinematic characteristics of the jet depending on the distance between the rotation of the air duct and the inlet.

Results. As a result of the study, a numerical model was chosen for the processes of the jet flow of air or air masses from the supply openings located at different distances from the bend. The distribution of pressures in the section at the outflow of the jet and velocities along the length of the jet is obtained.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to consider the possibility of using a numerical model of the process of the outflow of an air jet at an angle when calculating air distribution and increasing the efficiency of air circulation in rooms for various purposes.

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

For citation: Kareeva J. R., Zakieva R. R. Verification of the numerical model of the process of jet outflow from the inlet at an angle // *Izvestiya KGASU*. 2021. 4 (58). P. 82-89. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_82.

References

1. Shopayeva A., Safiullin R. CFD-modeling of flow in confluence nodes of ventilation units of multi-storey buildings: dig. of art. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012157>.
2. Kocharyants, K.V.: Numerical simulation of air distribution by fair overlaying jets. Selection of turbulence model. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016. – № 4(57). – P. 128-133.
3. Naumov A.L., Kapko D.V., Brodach M.M. Ventilation systems with local recirculation diffusers // *Energy Build.* 85.2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.050>.
4. Ivanov N.G., Zaslomova M.A. Large eddy simulation of airflow in a test ventilated room // *J.Phys. Conf. Ser.* 1038, 12136. 2018.
5. Zaslomova M.A., Ivanov N.G., Markov D. Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D sidewall JET. I. Foundations for eddy-resolving approach application based on periodical formulation. // *St. Petersburg. State Polytech. Univ. J. Phys. Math.* 13. 2020. <https://doi.org/10.18721/JPM.13305>
6. Zaslomova M.A., Ivanov N.G., Markov D: Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D Sidewall JET. II. LES-computations for the room with finite width. // *St. Petersburg. State Polytech. Univ. J. Phys. Math.* 13 (2020). <https://doi.org/10.18721/JPM.13306>
7. Ricci A., Kalkman I., Blocken B., Burlando M., Repetto M.P. Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment. // *Build. Environ.* 171. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106617>
8. Nguyen Ch.K., David D., Kuznik Fr. Full-scale experimental study of ceiling turbulent air jets in mechanically ventilated rooms. 2017.
9. Xie H., Zhang S., Guan X. Shanghai Ligong Daxue Xuebao // *J.Univ. Shanghai Sci. Technol.* 39, 81. 2017. <https://doi.org/10.13255/j.cnki.jusst.2017.01.014>.
10. Teodosiu C., Ilie V., Teodosiu R. Appropriate CFD turbulence model for improving indoor air quality of ventilated spaces. // *Math. Model. Civil Eng.* 10, 28. 2015. <https://doi.org/10.2478/mmce-2014-0020>.
11. Mularski J., Arora A., Saeed M.A., Nied'zwiecki Ł., Saeidi S. Impact of turbulence models on the air flow in a confined rectangular space. // *Eng. Sci. Technol.* 2020. <https://doi.org/10.37256/est.212021627>
12. Teodosiu R., Niculița L., Teodosiu C. Computational fluid dynamics based modeling of a linear heat source. // *Environ. Eng. Manag. J.* 13. 2014. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.216>.
13. Tabunshchikov Y.A., Shkarpet V.E., Kapko D.V., Brodach M.M., Kochariants K.V. Installing local recirculation air diffusers during building deep renovation reduces energy consumption of ventilation systems. // *Energy Procedia.* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.149>.
14. Ziganshin A.M., Batrova K.E., Logachev K.I., Mingazeeva D.N. Numerical modelling of energy efficient exhaust orifices and hoods in ventilation and air conditioning systems in buildings and facilities of thermal power plants: dig. of art. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* (2019). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012134>
15. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Gol'tsov A.B. Reducing power consumption of local exhaust ventilation systems. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042015>
16. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Averkova O.A., Logachev A.K. A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods. // *Energy Build.* 173. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036>

17. Kareeva J., Bliznyakova K., Ashadullina D., Zakieva R.: Influence of geometrical parameters of air inlet hole on the kinematic characteristics of jet: dig. of art. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012164>
18. Kareeva, J., Bliznyakova, K., Zakieva, R.: Numerical Study of the Influence of the Inlet Geometric Parameters on the Jet Characteristics: dig. of art. STCCE 2021, LNCE 169, pp. 364–371, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80103-8_39