

ISSN



Research Article Received: December 11, 2022

Accepted: December 21, 2022

Published: December 29, 2022

Verification of the numerical model for the convective jet flow near the side hood

Kareeva, Juliya Rustemovna¹ ^{*} Gabdrafikov, Rustam Railevich¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia Correspondence:* email <u>jkareeva2503@gmail.com</u>; contact phone <u>+79276766337</u>

Keywords:

Numerical method; Turbulence models; Wall functions; Convective jet; Local exhaust ventilation; Side hood

Abstract:

The object of research is a free convective jet located near the side hood. The aim of the study is to choose a calculation model that most adequately describes the development of a free convective jet above the definition of a heat source and a convective jet near a side hood located at a certain height above the heat source. **Method.** The problem is solved numerically using the Fluent software package. At the first stage, modelling of a free convective jet is proposed. For comparison, a number of problems are solved with a combination of turbulence models and near-wall functions. On the tendency to switch the flow of the convective jet at the side hood. **Results**. As a result of the numerical solution, the velocity and temperature distributions along the axis of the convective jet are obtained. The results are compared, calculated with the construction of theoretical data. A combination of turbulence and wall function models is chosen, which most accurately describes the flow of a convective jet near the side hood.

1 Introduction

В производственных зданиях одной из наиболее часто встречающихся вредностей, выделяющихся в результате различных производственных процессов, является тепло. При отклонении уровня нормальной для человека температуры воздуха 23–25 С (производительность при такой температуре принимается 100%, а физическое состояние оценивается как норма) производительность и самочувствие человека, находящегося в помещении, снижается.

Для наиболее эффективной работы системы вентиляции в помещениях с теплоизбытками совместно с общеобменной используется местная вытяжная вентиляция [1]-[3]. Авторами Сотниковым А.Г и Боровицким А.А. [1] проведен анализ основных типов и конструкций местных вытяжных устройств, а также предложен аналитический метод обобщения исследуемой эффективности [2]. В работе [3] исследовано изменение воздействия сварочного дыма в отсутствии и при наличии местной вытяжной вентиляции при реконструкции цеха медного комбината.

Для определения наиболее эффективной местной системы вентиляции важно знать характеристики вредных веществ, распространяющихся в помещении в результате производственного процесса. Так, в работах, в которых исследуются характеристики свободной плоской [4]-[6] и осесимметричной [7] конвективной струи, возникающей у вертикальной пластины и у горизонтального теплоисточника. В работе [4] авторы исследовали конвекцию над горизонтальным источником, заделанным заподлицо при использовании разных вариантов моделей турбулентности. Посохин В.Н, Зиганшин А.М., Романов С.В. [5] численно исследовали естественную конвекцию у горизонтального заглубленного источника. Как изменяется

2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 105 Article No 10510. doi: 10.4123/CUBS.105.10



эффективность теплоотдачи от вертикальной стенки, обдуваемой воздухом было рассмотрено в работе [6]. Авторы работы получили зависимости критерия Нуссельта от скорости воздуха, обдувающего нагретую пластину.

Известны работы, в которых рассматриваются эффективность улавливания пылевых частиц [8] и конвективного тепла [9] местными боковыми отсосами-раструбами. В данных статьях авторы изучали вихревые зоны у местных отсосов и их влияние на эффективность улавливания. Сравнение эффективности боковых отсосов при улавливании газовых и тепловых выбросов приведено в статье [10]. Представлена эффективность работы системы местной вытяжной вентиляции при наличии паров и дыма, а также предложены рекомендации по улучшению работы системы [11].

На эффективность работы местной вытяжной вентиляции также оказывает влияние воздушный поток, направляющий вредные выделения в сторону вытяжного отверстия [12]. В работах [12]-[14] рассматривается численное моделирование работы местных вытяжных устройств при совместной работе с приточными струями. При этом получено, что существует максимальное значение расхода приточного, увеличение которого не приводит к увеличению эффективности работы местного отсоса [13].

Для получения адекватных результатов численного решения необходимо выбрать наиболее подходящую комбинацию модели турбулентности и пристеночных функций – математическую модель. В программном комплексе Fluent существует ряд моделей турбулентности, каждая из которых имеет свои разновидности, и, кроме этого, ряд пристеночных функций.

Данным исследованиям посвящено много работ [15]-[22]. Одной из самой часто используемой модели турбулентности является модель к- є в сочетании с пристеночной функцией Standard Wall Function (SWF) [16]. Эта модель турбулентности используется для расчётов вблизи стенок, рядом с которыми возникают вихревые зоны и отрыв струи. Автор статьи, сравнивая модели k- ε SWF, k-ω «стандартная» k-ω Standard и k-ω SST с результатами физического эксперимента, говорит, что k-ε SWF не только имеет наименьшие отклонения от результатов эксперимента, но и то, что это самый быстрый способ расчёта. Автор следующей статьи, сравнивал между собой модели турбулентности «стандартная» k-ε Standard, k-ε RNG и kє Realizable [18]. Модель RNG лучше модели Standard так как, она имеет дополнительный член в уравнении диссипации, который в свою очередь улучшает точность вычислений. Но также RNG не стоит выбирать для решения задачи, если скорость потока большая, так как, это приводит к существенным погрешностям. Модель турбулентности k-ε Realizable лучше использовать для круглых сечений, в противном случае результаты получаются неудовлетворительными [18]. Также, стоит учитывать, что пристеночные функции RNG и Realizable очень похожи в начале пути, но по мере удаления от истечения, линии тока рознятся [19]. Сравнивая k-ε SWF, k-ε N-EWF, k-ω SST с результатами физического эксперимента, учёные следующей статьи, пришли к выводам, что модель k-ω SST даёт сильные погрешности в начале истечения струи воздуха, все остальные значения имеют допустимые погрешности [20]. Изучая значения КМС, полученных при разных моделях турбулентности, а именно k-ε SWF, k-ε EWT, RSM SWF, RSM EWT, k-ω и далее сравнивая результаты со значениями из известного источника - справочник Идельчика и зарубежных статей, пришли к выводу, что RSM SWF и k-ε EWT это лучшие модели, так как при них получились значения более близкие к экспериментальным. Но модель RSM SWF имеет нехарактерную форму в области замыкания вихревой зоны, поэтому авторы рекомендуют использовать в расчётах модель k-ε EWT [21], [22].

Большое количество моделей турбулентности с различным числом дифференциальных уравнений приводит к отсутствию единого мнения о том, какая из комбинаций более точно описывает тот или иной процесс. Таким образом необходимо при решении конкретных задач подтверждать их достоверность.

Целью исследования, представленного в статье, является выбор модели численного решения, наиболее адекватно описывающей развитие свободной конвективной струи над плоским теплоисточником и конвективной струи около бокового отсоса, расположенного на некоторой высоте над теплоисточником. Для достижения поставленной цели задача решается в два этапа:

- исследование влияния комплекса моделей турбулентности и пристеночных функций на характеристики свободной конвективной струи;



- исследование влияния пристеночных функций на характеристики конвективной струи, развивающейся около бокового отсоса.

2 Materials and Methods

Задача решается численно с помощью программного комплекса Fluent.





Рис.1 а) свободная конвективная струя: геометрия и линии тока; б) схема измельчения сетки области

Fig. 1a) free convective jet: geometry and streamline; b) area mesh refinement scheme

Рассматривается задача о естественной конвекции около теплоисточника, заделанного заподлицо (рис.1). Размер теплоисточника 2b₀=0.2м, мощность Q₀=400 Вт, размер исследуемой области: ширина - 2B=2.2 м; высота - H=2.2 м.

Для получения наиболее адекватных результатов в процессе решения необходимо добиться достаточного разрешения расчетной сетки, то есть исследовать задачу на сеточную зависимость. В качестве контролируемого параметра была принята осредненная температура на теплоисточнике - BC.

На первом этапе было выполнено измельчение сетки на всей области исследуемой геометрии. Далее область измельчения уменьшалась. Наибольшее внимание было уделено измельчению сетки у теплоисточника. В этой области происходят ключевые процессы, наиболее заметно влияющие на конечный результат. Стратегия адаптации представлена на рисунке 1а и ниже в таблице 1.

Таблица 1. Стратегия адаптации сетки Table 1. Mesh adaptation strategy

№ адаптации	Область адаптации				
	(x ₀ ;y ₀)	(X ₁ ;y ₁)			
1	Исходная сетка				
2	(0;0)	(2.2;2.2)			
3	(0.9;0)	(1.3;0.3)			
4	(0;0)	(2.2;2.2)			
5	(0;0)	(2.2;2.2)			
6	(0.95;0)	(1.25;0.2)			
7	(1;0)	(1.2;0.1)			

В задаче рассматривается влияние использования разных моделей турбулентности, представленных в программном комплексе Fluent на характеристики струи –скорость и избыточную температуру на оси конвективной струи. Для замыкания уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу используются уравнения моделей турбулентности: с одним уравнением (модель Спаларта-Аллмареса), с двумя уравнениям («стандартная» k-ε (KES), RNG k-ε, k-ε realizable и «Рейнольдсовых напряжений» RSM).

Kareeva J.R.; Gabdrafikov R.R.

Verification of the numerical model for the convective jet flow near the side hood;

2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 105 Article No 10510. doi: 10.4123/CUBS.105.10

 \odot

На втором этапе исследований рассматривается боковой отсос шириной 2h=0.2м с постоянной скоростью всасывания u₀=0.7 м/с, (рис. 2), расположенный на высоте h₁=0.75м. Геометрия исследуемой области такая же как и в задаче 1. Средняя скорость всасывания определена, исходя из условий представленных в [25]:

$$\bar{u}_{av} = 0.032 \left(\frac{Q_c}{b}\right)^{1/3} \sqrt{1 + 1.58 \left(\frac{h_1}{b} - 0.2\right)},$$
(1)

где Q_c - конвективная составляющая тепловыделения.

Исследуется изменение характеристик течения при использовании разных пристеночных функций. Вычислительный комплекс Fluent имеет в своем распоряжении две основных модели – использование пристеночных функций («стандартные» – Standard Wall Functions (SWF) и «неравновесные» – Non-equilibrium Wall Functions (NWF) и «расширенное пристеночное моделирование» (Enhanced Wall Treatment – EWT). При использовании пристеночных функций в области вблизи твердых стенок решаются специальные полуэмпирические уравнения для связывания значений на стенке и в ядре течения, получаемые при решении уравнений движения Рейнольдса.



Рис. 2 Боковой отсос у теплоисточника: геометрия и линии тока Fig. 2 Side hood at the heat source: geometry and streamlines

Граничные условия, принятые в исследовании:

- LK (вытяжное отверстие) – Velocity inlet: равномерный профиль скорости, скорость направлена по нормали к границе: u₀ = const; k = 0; ε = 0;

- AB, CD, AF, FE, ED (свободные границы течения) – Pressure Outlet: избыточное давление $\Delta p=0$; скорость направлена по нормали к границе - $\overline{u} = u_n$, dk/dn=0, dɛ/dn=0;

- BC, ML и LK (непроницаемые стенки) Wall: u = 0, (du_n)/dn=0;

здесь d/dn – производные по нормали к границе.

В результате решения получены изменение осевых параметров конвективной струи. Результаты представлены в безразмерном виде:

Для выбора наиболее адекватной модели численного решения, полученные результаты сравнивались с известными теоретическими данными для свободной конвективной струи [26], [27].

3 Results and Discussion

Линии тока течения, полученные при использовании разных вариантов моделей турбулентности, показывают схожий качественный характер течения свободной конвективной струи, возникающей у теплоисточника (рис.1а). Исключение составляет k-w модель, в случае которой происходит искривление струи, что говорит о неадекватности модели и невозможности ее использования для решения задач о естественной конвекции (рис.3).





Рис. 3 Линии тока свободного конвективного течения, модель k-w Fig. 3 Streamlines of free convective flow, model k-w

При проведении верификации построены значения средней температуры на теплоисточнике, найденные на каждом этапе измельчения сетки и для каждого из исследованных сочетаний моделей. Были исследованы следующие сочетания моделей турбулентности и пристеночных функций: k- ε standard SWF/NEWF/EWT; k- ε RNG SWF/NEWF/EWT; k- ε realizable SWF/NEWF/EWT; k- ω standard/SST; RSM linear SWF/NEWF; RSM low-re.



Рис.4 Изменение средней температуры на поверхности теплоисточника от у+ Fig.4 Change in the average temperature on the surface of the heat source from y+

На рисунке 4 видно, что относительно стабильный характер поведения скорости при измельчении сетки наблюдается для сочетаний: SKE NEWF, RNGKE EWT, RSM low-re, realizable NEWF и realizable EWT. Для этих моделей максимальный разброс значений на последних адаптациях сетки (при y+<5) не превышает. 0.1%. Остальные модели показывают разброс от 0.5% до 1%, что можно также считать допустимым.





Рис. 5. Изменение осевой скорости свободной конвективной струи при разных адаптациях Fig. 5 Variation of the Axial Velocity of a Free Convective Jet with Different Adaptations

На рисунке 5 представлен график зависимости осевой скорости по высоте конвективной струи при сочетании стандартной k- ε модели турбулентности с неравновесными пристеночными функциями (NEWF) для разной степени измельчения сетки. Видно, как на первых адаптациях происходит изменение параметров относительно друг друга. Так, к примеру максимальное различие значений осевой скорости между первой и второй адаптацией 16.7%, когда между 5 и 7 адаптацией максимальное отклонение не превышает 1.67%, а значение при 6 и 7 адаптациях совпадают, что говорит о достаточном разрешении сетки и возможности дальнейшего ее использования.

Результаты, полученные численно сравнивались с результатами, вычисленными по формуле для определения осевой скорости (2), представленной в [24] и формуле (3) [25]:

$$\overline{u}_{y} = \frac{u_{y}}{\sqrt[3]{\left(gQ_{c}/c_{p}\rho_{\infty}T_{\infty}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{1+\Pr_{t}}{4\Pr_{t}}} \overline{y}^{1/3} \left(erf\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\cdot\frac{1}{c\overline{y}}\right)\right)^{1/3},$$
(2)

$$\overline{u}_{y} = \frac{u_{y}}{\sqrt[3]{(gQ_{c}/c_{p}\rho_{\infty}T_{\infty})}} = \frac{0,065Q_{c}^{1/3}}{\sqrt[3]{(gQ_{c}/c_{p}\rho_{\infty}T_{\infty})}},$$
(3)

где: *u_y* - безразмерная осевая скорость; c_p – теплоемкость воздуха, ρ_∞ - плотность воздуха на бесконечности при температуре окружающего воздуха T_∞, Pr_t – турбулентное число Прандтля (0.85), *y* = *y* / *b*₀ – безразмерная координата.

Численное решение показало, что при использовании разных моделей турбулентности получаются разные значения конвективной и радиационной составляющей тепловыделений (таблица 1). Конвективная составляющая *Q*_c далее использовалась в расчетах (формулы 2 и 3).

Модель	k-ε	k-ε	k-ε RNG	RSM	SA
турбулентности	стандартная	realizable			
Q_{rad}	51.82	45.27	53.35	43.7	54.
					13
Q _{КОНВ}	28.18	34.73	26.65	36.3	25.
					87

Таблица. Радиационная и конвективная составляющие





Рис.6 а) изменение осевой скорости по высоте струи при использовании разных моделей турбулентности; б) изменение избыточной температуры по высоте струи при использовании разных моделей турбулентности

Fig.6 a) change in axial velocity along the height of the jet when using different turbulence models; b) change in excess temperature along the height of the jet when using different turbulence models

На рисунке 6а представлено изменение осевой скорости в струе при использовании различных моделей турбулентности. Там же показаны линии, полученные по формулам (2) и (3).

На расстоянии примерно 12b₀ струя имеет начальный участок. В этом случае формула (3) не имеет смысла, так как пригодна только для основного участка струи. На основном участке наиболее адекватные результаты получаются при использовании моделей k- ε стандартная и RSM.

На рисунке 6б представлены изменения безразмерной избыточной температуры по длине струи, полученные численно и по формуле (4) [25].

$$\Delta \bar{t}_{y} = \frac{0.064 Q_{c}^{2/3} y^{-1}}{\Delta t_{\infty}},$$
(4)

где: Δt_y - безразмерная избыточная температура на оси струи.

Результаты, полученные численно близки друг другу. Наиболее близкое значение к теоретическим данным дает использование стандартной k- ε модели.



Fig.7 Variation of the axial velocity along the jet height when using different near-wall functions

Как и ранее определена осевая скорость конвективной струи (максимальная скорость в сечениях), развивающейся около бокового отсоса. Рисунок 7 показывает, как влияет использование разных пристеночных функций на изменение скорости струи. Для сравнения полученных результатов на рисунке приведена линия, показывающая изменения осевой

Verification of the numerical model for the convective jet flow near the side hood;

2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 105 Article No 10510. doi: 10.4123/CUBS.105.10



скорости в свободной конвективной струе. Наиболее близкие результаты дают использование стандартных пристеночных функций и неравновесных.

4 Conclusions

В результате численного исследования рассмотрены все варианты комбинаций модели турбулентности с пристеночными функциями для свободной конвективной струи. Результаты показали, что наиболее близкие результаты к теоретическим исследованиям дает использование стандартной k- є модели совместно со стандартными пристеночными функциями.

Данная модель численного решения будет использована в дальнейшем при исследовании разных вариантов использования бокового отсоса около теплоисточника.

References

1. Sotnikov, A.G., Borovitsky, A.A. (2012) Systematization and generalization of local exhaust devices characteristics - the basis for engineering design techniques of effective industrial ventilation. *Magazine of civil engineering*, **6**, 54-59. https://doi.org/10.5862/MCE.32.8.

2. A.G. Sotnikov, A.A. Borovitskiy. (2012) Theoretical and experimental validation of the air changes in industrial ventilation optimization method. *Magazine of civil engineering*, **2**, 32-38. https://doi.org/10.5862/MCE.28.5.

3. Sajad, Z., Yaser, S., Hossein, H., Mokhles, B., Masoumeh, K., Rasoul. H. (2017) Designing, Constructing and Installing a Local Exhaust Ventilation System to Minimize Welders' Exposure to Welding Fumes. *Archives of Hygiene Sciences*, **6(4)**, 356-362. https://doi.org/10.29252/ArchHygSci.6.4.356.

4. Ziganshin, A.M., Posohin, V.N., Gorokhova. A.Y. (2016) About natural convection over horizontal heat sources. *News KSUAE*, **2(36)**, 140-145. https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhernala/arkhiv-zhurnala?sod=sod2_2016&idizv=27

5. Posokhin, V.N., Ziganshin, A.M., Romanov., S.V. (2011) Numerical study of convection above a volumetric deep extended heat source. *Regional architecture and construction*, **1**, 135-139. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15588313

6. Bartoli, C. (2011) Free convection enhancement between inclined wall and air in presence of expired jets at temperature difference of 40K. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **35**, 283-290. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.09.010.

7. Korovkin, V.N., Andrievskii. A.P. (2000) Turbulent free-convective jets: Numerical solution of model equations of transfer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **73**, 602–608, https://doi.org/10.1007/BF02681804.

8. Logachev, K., Ziganshin, A., Kryukova, O., Averkova, O., Kryukov, I., Gol'tsov, A. (2020) Improving dust capture efficiency with local exhaust hoods in manicure shop. *Building and Environment*, **181**, 107124. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107124.

9. Davidov, A., Kareeva, J., Gabdrafikov, R. (2020) A study of the source-sink system with uneven suction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **890**, 012166. https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012166.

10. Kilin, P. I. Research of regularities of detrimental impurities' diffusion propagation. (2011) *Bulletin of the ural state university of communications*, **1**, 66-78. https://www.usurt.ru/vestnik/arxiv/007_1_20_3_1.pdf

11. Pagukuman, D., Norerama, B., Leman, A., Yusof, M., Zainal, M. (2013) The Efficacy of Local Exhaust Ventilation (LEV) System Controls on Aerosols Exposures during Aluminium Cans. *Production Applied Mechanics and Materials*, 465-466:438-442. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.438.

12. Wang, Y., Quan, M., Zhou, Y., Cao, Y., Xie, Ch., Li, L. (2020) Experimental study on the flow field and economic characteristics of parallel push-pull ventilation system. *Energy and Built Environment*, **1**, 393-403. https://doi.org/ 10.1016/j.enbenv.2020.03.006.

13. Liu, K., Yang, Sh., Zeng, L., Gao, J., Hou, Y., Cao, Ch., Shi, B., Mo, X., Zhang, Q., Hou, Ch. (2020) Combining push-pull airflow and top draft hood for local exhaust of tyre vulcanization process. *Energy and Built Environment*, **1**, 296-306. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.04.008.

Kareeva J.R.; Gabdrafikov R.R.

Verification of the numerical model for the convective jet flow near the side hood;

^{2022;} Construction of Unique Buildings and Structures; 105 Article No 10510. doi: 10.4123/CUBS.105.10



14. Pankov, V.A. (2020) Influence of the scheme of organization of air exchange in the room on the efficiency of the exhaust hood. *E3S Web of Conferences*, **224**, 03026. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022403026

15. Kareeva, J.R., Zakieva R.R. (2020) Verification of the numerical model of the process of jet outflow from the inlet at an angle. *News KSUAE*, **4 (58)**, C. 82–89. https://doi.org/10.52409/20731523 2021 4 82.

16. Kocharyanc, K.V. Numerical modeling of air distribution by fan spreading jets. Choice of turbulence model. (2016) *Bulletin of Civil Engineers*, №4 (57), 128–133. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26673490

17. Kocharyanc, K.V., Deisikhina D.M. Inconstancy of the kinematic coefficient when flowing from modern air distribution devices (2017). *Scientific review*, **10**, 40–47. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30031681

18. Korkodinov, I.A. The review of set of k-i models for modeling turbulence. (2013) *Bulletin of the perm national research polytechnical university. mechanical engineering, materials science*, **1**, 5–16. https://ered.pstu.ru/index.php/mm/article/view/3326/2736#!

19. Mizkher, U.D., Velmisov, P.A. Application of the Ansys system to the study of jet turbulent flows. (2020) *Bulletin UIGTU*. **4**, 11–14. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45625211

20. Deisikhina, D.M., Ivanova, J.V., Mokrov, V.V. Numerical simulation of outflow from modern air distribution devices (2018). *Engineering Bulletin of Don.* **2**, 1-14. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35686419

21. Ziganshin, A., Eremina, S., Safiullina, G., Logachev, K. (2021) Numerical Study of the Flow in a Symmetrical Ventilation Junction Tee with a Baffle Vane. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **169**, 213–222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80103-8_23.

22. Ziganshin, A.M., Beljaeva, E.E., Sokolov, V.A. (2017) Pressure losses reduction with profiling of sharp elbow and elbow with dead-end. *News High. Educ. institutions. Constr,* **697**, 108–116. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29308655

23. Surikova, N.S. (2018) Features of calculation of ventilation hoods. *Scientific and technical problems of improvement and development of gas power supply systems*,**1**, 213-216. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34933562

24. Shepelev, I. A. Aerodynamic of indoor air. Stroyizdat. Moscow,1978. 14 5p. https://books.totalarch.com/n/1824

25. Grimitlin, M.I. Indoor air distribution. 2nd edn. Saint-Petersbyrg,1994. 315 p. https://elima.ru/books/?id=1498