

Д. т. н. **О. А. Аверкова**, д. т. н. **К. И. Логачёв** (✉), **Т. А. Козлов**,  
к. т. н. **Е. Н. Попов**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет  
имени В. Г. Шухова», Белгород, Россия

УДК 628.51

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВА ПОТОКА ПРИ ВХОДЕ В КРУГЛЫЕ ОТСОСЫ С ВЫСТУПОМ**

Рассмотрена целесообразность применения выступов для круглых отсосов-раструбов, используемых для улавливания загрязняющих веществ. Найдены границы вихревых зон на входе в отсосы-раструбы с выступами. Определены зависимости осевой скорости всасываемого воздушного потока для разных длин выступов и углов наклона раструбов.

**Ключевые слова:** местная вытяжная вентиляция, круглые отсосы-раструбы, вихревые зоны, отрывные течения, метод дискретных вихрей.

### **ВВЕДЕНИЕ**

**М**естная вытяжная вентиляция [1, 2] широко применяется в различных отраслях промышленности, гражданских и административных зданиях для обеспечения нормальных санитарно-гигиенических условий труда, отдыха и жизнедеятельности человека. Одним из главных элементов систем местной вентиляции является местный отсос, который непосредственно улавливает тепловые потоки [3, 4], сварочные дымы [5], пылевые аэрозоли [6, 7], пары, газы [8, 9], в том числе и при приготовлении пищи [10]. Наиболее распространены местные отсосы в виде вытяжных зонтов круглой [11], квадратной [12], щелевой [13] или прямоугольной формы. В настоящее время проводятся активные исследования по определению границ вихревых зон при входе как в отсосы [14], так и в другие фасонные элементы вентиляционных систем [15–17]. Профилирование по границам вихревых зон позволяет существенно снизить коэффициент местного сопротивления [18], а значит, и потери давления в системах вентиляции, что позволит снизить их энергопотребление. Вытяжные зонты рассматривали в виде отсосов-раструбов [11–13] без различных уступов или выступов, которые, как утверждается в ряде источников, повышают их эффективность [19, 20]. При угле раскрытия зонтов больше 60°

площадь вихревых зон резко возрастает, снижается область эффективного всасывания и следует использовать выступы (рис. 1) или уступы, позволяющие достичь эффективного всасывания. Подобные зоны с выступом используются и за рубежом [3, 21].

Цель настоящей работы — определение границ вихревых зон на входе во всасывающие зонты с выступом и эффективности их захвата.



**Рис. 1.** Вытяжные зонты квадратной и прямоугольной формы с выступом



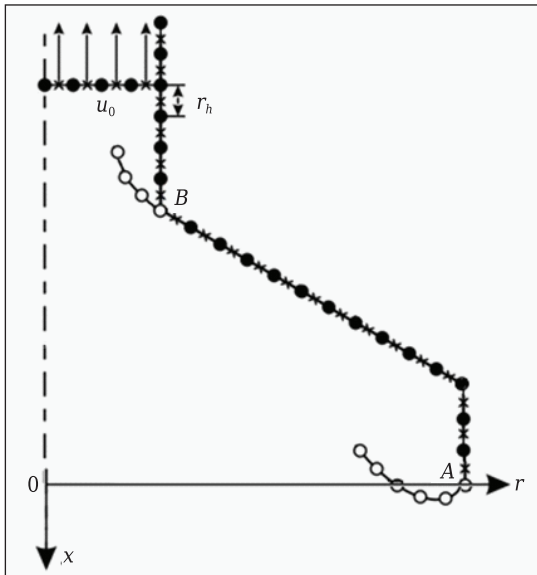
К. И. Логачёв  
E-mail: kilogachev@mail.ru

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Дискретную математическую модель строили при помощи стационарных дискретных вихревых колец без самоиндукции с учетом образования первой и второй вихревых зон с острых кромок *A* и *B* (рис. 2) соответственно. Метод дискретных вихрей — это численный метод решения сингулярных интегральных уравнений, математически обоснованный в монографиях [22, 23].

Интенсивность (циркуляция) вихревых колец заранее неизвестна. Крестиками изображены расчетные (контрольные) точки, в которых известны граничные значения скорости вдоль направлений внешней нормали. Поскольку граница течения осесимметрична, задача становится двумерной. Координаты любой точки (кольца) задаются расстоянием от входа в отсос-раструб *x* и расстоянием *r* до оси симметрии *Ox* (см. рис. 2). В активном (всасывающем) сечении в расчетных точках известна величина *u<sub>0</sub>*. В остальных расчетных точках нормальная составляющая скорости равна нулю. На оси симметрии расположено вихревое кольцо с нулевым радиусом. Число дискретных вихревых колец *N*, столько же контрольных точек. Шаг дискретности *r<sub>h</sub>* (см. рис. 2) — это расстояние между двумя соседними вихревыми кольцами, он равномерен. Свободные поверхности тока, сходящиеся с острых кромок *A* и *B*, определяются итерационным путем.

Известная величина нормальной составляющей скорости в точках *x<sup>p</sup>* выражается через неизвестные циркуляции всех вихревых колец:



**Рис. 2.** Дискретная математическая модель отрывного течения круглого вытяжного зонта с выступом: *u<sub>0</sub>* — скорость всасывания; *r<sub>h</sub>* — шаг дискретности; ● — присоединенные вихри (вихревые кольца, дискретизирующие непроницаемую поверхность); ○ — свободные вихревые кольца образуют свободную поверхность тока, ограничивающую вихревые зоны

$$v_n(x^p) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x^p, \xi^q) + \gamma_1 \sum_{q=1}^{N_{s1}} G(x^p, \zeta_1^q) + \gamma_2 \sum_{q=1}^{N_{s2}} G(x^p, \zeta_2^q), \quad (1)$$

где *N<sub>s1</sub>* — количество вихревых колец первой свободной поверхности тока; *N<sub>s2</sub>* — количество вихревых колец второй свободной поверхности тока; *x<sup>p</sup>* — расчетная точка, *p* = 1, 2, ..., *N*;  $\Gamma(\xi^q)$  — циркуляция присоединенного вихря в кольце (точке)  $\xi^q(\xi_1^q, \xi_2^q)$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  — циркуляции свободных вихревых колец первой и второй свободных поверхностей тока;  $\zeta_1^q, \zeta_2^q$  — точки их размещения; *G(x, ξ)* — скорость вдоль единичного направления *n* = {*n<sub>1</sub>*, *n<sub>2</sub>*} в точке *x*(*x<sub>1</sub>*, *x<sub>2</sub>*), вызываемая кольцевым вихрем единичной интенсивности, расположенным в точке  $\xi(\xi_1, \xi_2)$ :

$$G(x, \xi) = \frac{4(A_1 b + A_2 a)}{b(a-b)\sqrt{a+b}} \int_0^{\pi/2} \frac{\sqrt{1-t^2} \sin^2 \theta d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}} - \frac{4A_2}{b\sqrt{a+b}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}} \text{ при } b \neq 0,$$

$$A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}, A_2 = \frac{\xi_2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1)n_2 - x_2 n_1], t = 2b/(a+b),$$

$$G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 n_1}{2a\sqrt{a}} \text{ при } b=0, 2x_2 \xi_2 = b > 0, a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2.$$

При  $\sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2} < r_h$  функция  $G(x, \xi) = ((x_1 - \xi_1)n_2 - (x_2 - \xi_2)n_1)/(2\pi r_h^2)$ . Когда *x* =  $\xi$ , функция *G(x, ξ)* = 0.

Неизвестные циркуляции вихревых колец определяются путем решения системы линейных алгебраических уравнений (1), *p* изменяется от 1 до *N*. Искомая скорость в области течения определяется по выражению (1), в котором вместо *x<sup>p</sup>* необходимо использовать координаты этой точки. Итерационный процесс определения свободных поверхностей тока осуществляется следующим образом. На первой итерации строятся линии тока с острых кромок *A* и *B*. На них размещаются свободные вихревые кольца с шагом *r<sub>h</sub>*. Далее снова решается система уравнений для определения неизвестных циркуляций вихревых колец и снова строятся линии тока. Итерации производятся до тех пор, пока  $|\gamma_1 - \gamma'_1| > \epsilon$ ,  $|\gamma_2 - \gamma'_2| > \epsilon$ , где штрихом обозначены циркуляции на текущей итерации, а без штриха — на предыдущей итерации.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Из картин течений вблизи отсосов-раструбов длиной 5 калибров (калибр — радиус всасывающего патрубка) с выступами длиной *d<sub>v</sub>* 0,5, 1, 2 (рис. 3) следует, что размеры первой вихревой зоны, образующейся при срыве потока из точки *A* раструба, существенно возрастают при увеличении *d<sub>v</sub>*. Это верно для всех рассмотренных углов наклона раструбов (90°, 75°, 60°, 45°, 30°). Штрих-пунктирной линией показаны границы первой вихревой зоны для случая отсутствия выступа. Здесь и далее все геометрические размеры отнесены к радиусу *R*. Скорость отнесена к скорости всасывания *u<sub>0</sub>*. В частности, растет максимальная длина отхода свободной поверх-

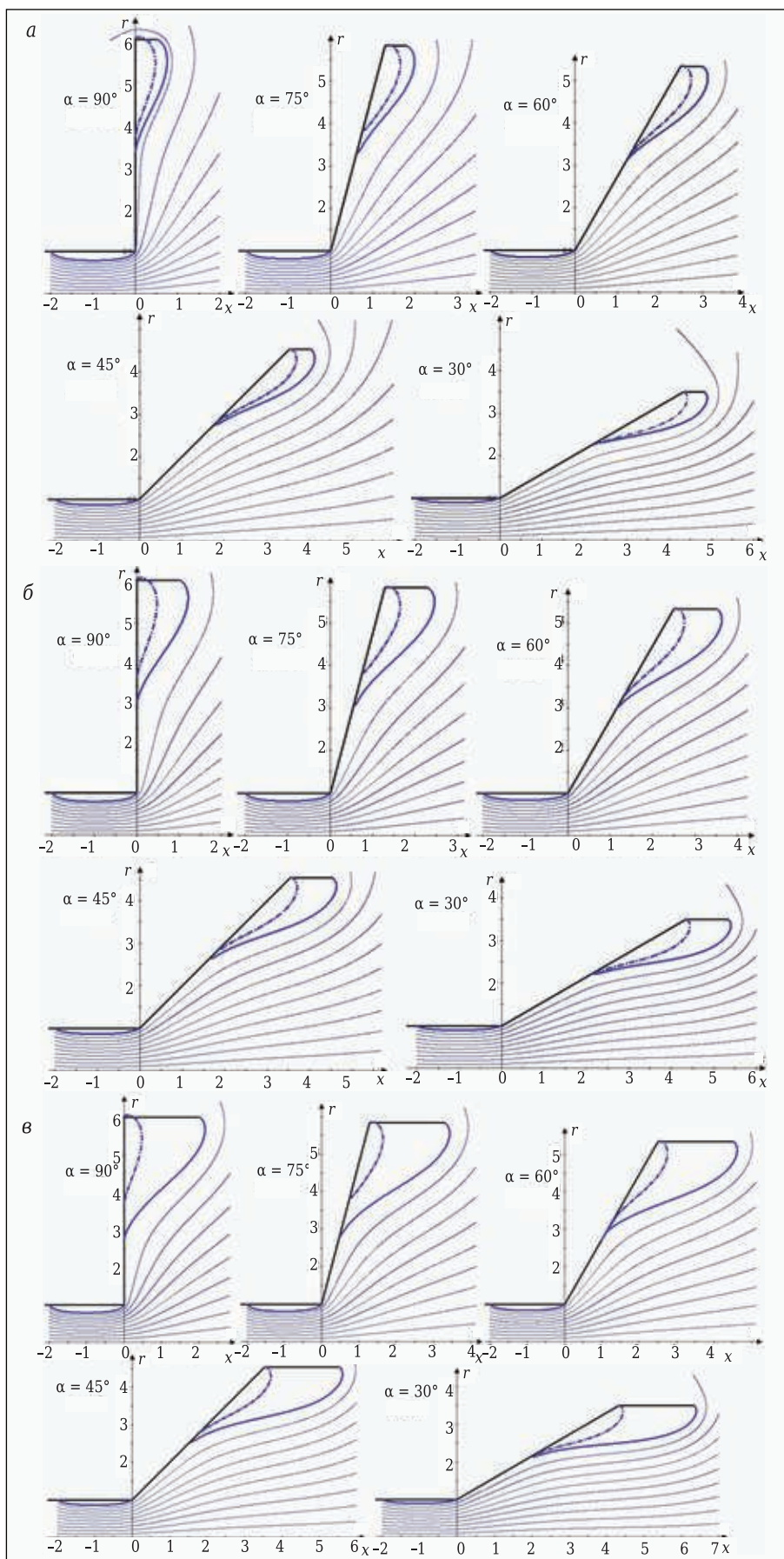
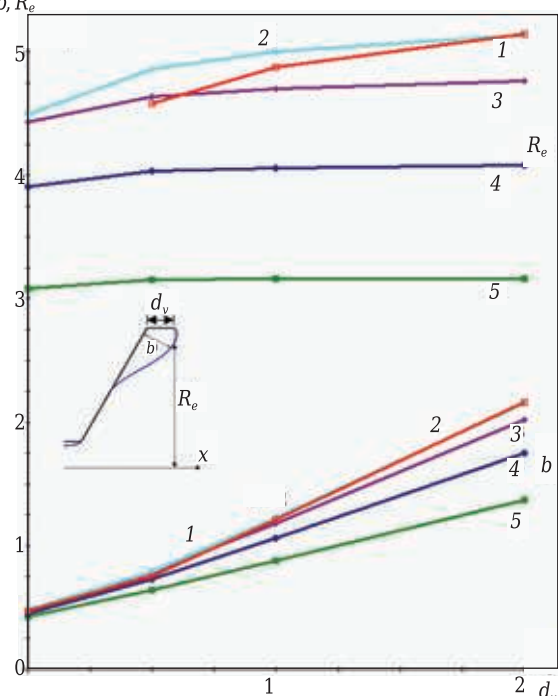


Рис. 3. Линии тока на входе в круглый отсос-раструб с выступом длиной  $0,5R$  (а),  $R$  (б) и  $2R$  (в)

ности тока  $b$  от направления раструба (рис. 4) при увеличении длины выступа. Здесь же заметен небольшой рост радиуса эффективного всасывания  $R_e$ . Границы второй вихревой зоны  $b, R_e$



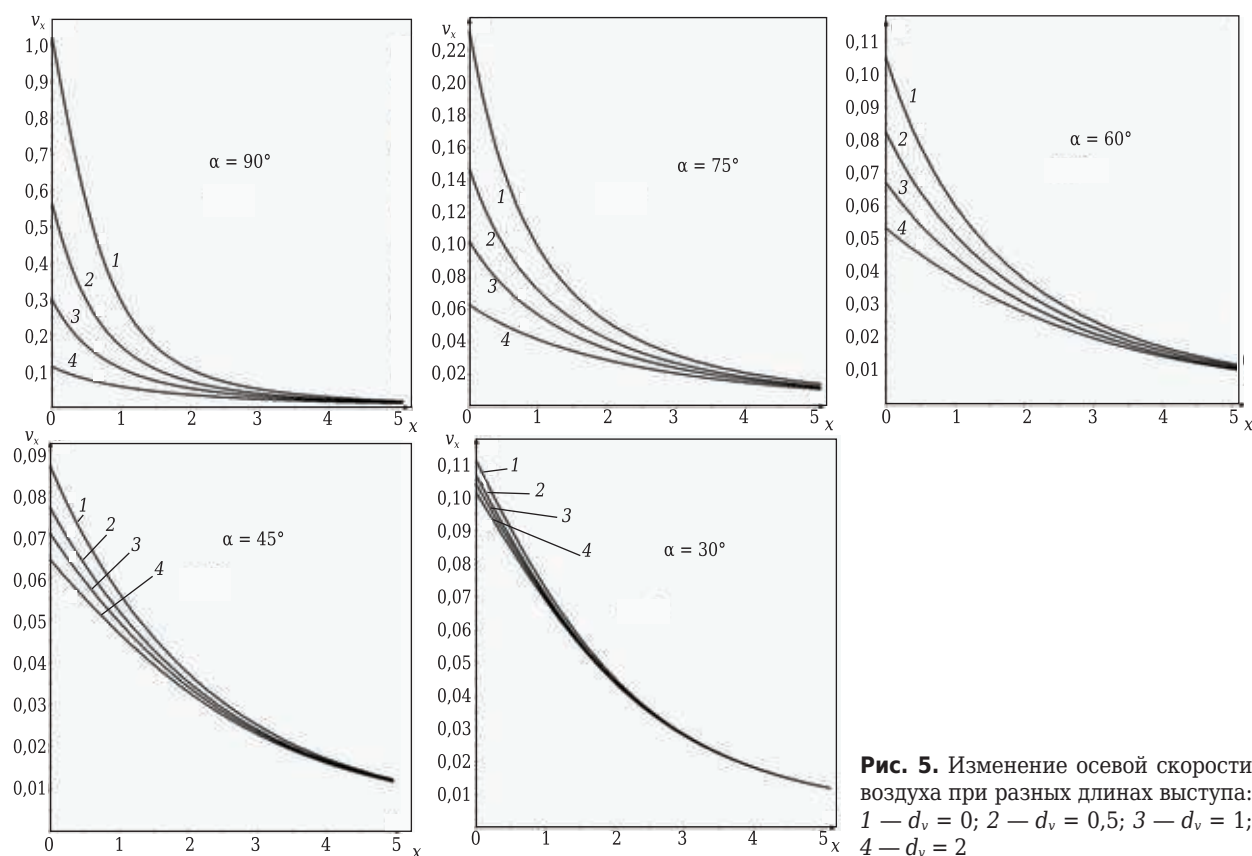
**Рис. 4.** Изменение характерных размеров первой вихревой зоны в зависимости от длины выступа: 1 — 90°; 2 — 75°; 3 — 60°; 4 — 45°; 5 — 30°

практически не изменяются при оборудовании отсоса-раструба выступом.

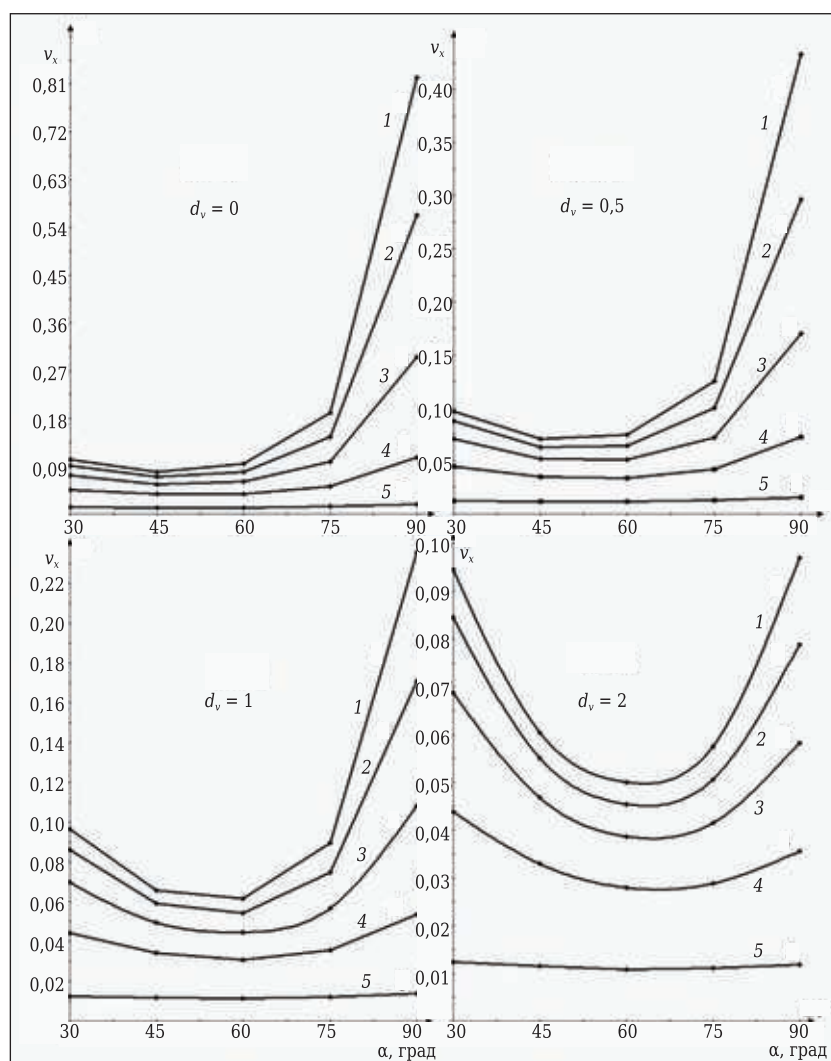
Произведен расчет осевой скорости от 0 (см. рис. 2) до 5 калибров для всех рассмотренных углов наклона раструба (рис. 5). Наличие выступа снижает скорость захвата отсоса при увеличении длины выступа. Максимальная величина скорости захвата соответствует случаю отсутствия выступа.

На рис. 6 показано изменение осевой скорости в фиксированных точках при изменении угла наклона раструба. С увеличением длины выступа минимум смещается от 45° к 60°, при этом он становится более глубоким. Для величины  $d_v = 2$  и удаления более 0,2 калибра осевая скорость в случае  $\alpha = 30^\circ$  становится наибольшей. В остальных случаях наибольшая осевая скорость наблюдается для угла наклона  $\alpha = 90^\circ$ . Подробное численное и экспериментальное исследование влияния угла наклона и длины раструба круглого и щелевого отсосов на поле скоростей вблизи них осуществлено в статьях [11, 12]. Там же показана достоверность и адекватность расчетов, осуществленных в предположении идеальности и несжимаемости воздушного потока, всасываемого отсосами-раструбами.

Дальнейшее направление исследований предполагает расчет отсосов-раструбов над конвективными источниками. При этом необходимо оценить влияние выступов на эффективность



**Рис. 5.** Изменение осевой скорости воздуха при разных длинах выступа: 1 —  $d_v = 0$ ; 2 —  $d_v = 0,5$ ; 3 —  $d_v = 1$ ; 4 —  $d_v = 2$



**Рис. 6.** Изменение осевой скорости течения в фиксированных точках при изменении угла наклона раструба и разных длинах выступа. Кривая 1 соответствует случаю удаления от начала координат 0,2, кривая 2 — 0,5, кривая 3 — 1, кривая 4 — 2, кривая 5 — 5

захвата тепловых потоков. Кроме того, представляют интерес выступы, расположенные под разными углами, и их размеры, сокращающие границы возникающих вихревых зон, что приведет к снижению коэффициента местного сопротивления (КМС) входа в отсосы-раструбы. По найденным границам вихревых зон необходимо провести профилирование, что позволит еще больше снизить КМС, а также повторный вынос загрязняющих веществ, который может происходить из вихревых зон.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По разработанной компьютерной программе, основанной на итерационной вычислительной процедуре и использовании стационарных кольцевых дискретных вихрей, определены границы вихревых зон, возникающих на входе в отсосы-раструбы с выступом. Определено, что с увеличением длины выступа размеры первой вихревой

зоны возрастают, а значит, возрастает коэффициент местного сопротивления входа в раструб. Размеры второй вихревой зоны для длинных отсосов-раструбов не изменяются. Скорость захвата на оси отсоса для углов наклона раструба 30°, 45°, 60°, 75°, 90° снижается при увеличении длины выступа. Наибольшая скорость захвата достигается для отсоса-раструба без выступа. Полученные результаты будут полезны в практике проектирования, создания и эксплуатации вытяжных зонтов.

\*\*\*

*Исследования выполнены в рамках гранта Президента РФ для ведущей научной школы НШ-25.2022.4, федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ имени В. Г. Шухова.*

**Библиографический список**

1. *Huang, Y.* Performance of constant exhaust ventilation for removal of transient high-temperature contaminated

- airflows and ventilation-performance comparison between two local exhaust hoods / *Y. Huang, Y. Wang, L. Liu* [et al.] // *Energy and Buildings*. — 2017. — Vol. 154. — P. 207–216. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.061.
2. **Vekteris, V.** Investigation of the efficiency of the lateral exhaust hood enhanced by aeroacoustic air flow / *V. Vekteris, I. Tetsman, V. Mokshin* // *Process Saf. Environ. Prot.* — 2017. — Vol. 109. — P. 224–232. DOI: 10.1016/j.psep.2017.04.004.
3. **Jeong, S.** A study on the improvement of ventilation rate using air-flow inducing local exhaust ventilation system / *S. Jeong, S. H. Kwon, S. Ahn* [et al.] // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. — 2016. — Vol. 15, № 1. — P. 119–126. DOI: http://doi.org/10.3130/jaabe.15.119.
4. **Huang, Y.** Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant / *Y. Huang, Y. Wang, L. Liu* [et al.] // *Build. Environ.* — 2015. — Vol. 85. — P. 94–103. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.038.
5. **Flynn, M. R.** Local exhaust ventilation for the control of welding fumes in the construction industry — a literature review / *M. R. Flynn* // *Ann. Occup. Hyg.* — 2012. — Vol. 56, № 7. — P. 764–776. DOI: 10.1093/annhyg/mes018.
6. **Shepherd, S.** Reducing silica and dust exposures in construction during use of powered concrete-cutting hand tools: efficacy of local exhaust ventilation on hammer drills / *S. Shepherd, S. R. Woskie, C. Holcroft, M. Ellenbecker* // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. — 2009. — Vol. 6, № 1. — P. 42–51. DOI: 10.1080/15459620802561471.
7. **Ojimai, J.** Efficiency of a tool-mounted local exhaust ventilation system for controlling dust exposure during metal grinding operations / *J. Ojimai* // *Ind. Health*. — 2007. — Vol. 45, № 6. — P. 817–819. DOI: 10.2486/indhealth.45.817.
8. **Gonzalez, E.** Influence of exhaust hood geometry on the capture efficiency of lateral exhaust and push-pull ventilation systems in surface treatment tanks / *E. Gonzalez, F. Marzal, A. Minana, M. Doval* // *Environ. Prog.* — 2008. — Vol. 27, № 3. — P. 405–411. DOI: 10.1002/ep.10287.
9. **Chern, M. J.** Numerical investigation push-pull and exhaust of turbulent diffusion in fume cupboards / *M. J. Chern, W. Y. Cheng* // *Ann. Occup. Hyg.* — 2007. — Vol. 51, № 6. — P. 517–531. DOI: 10.1093/annhyg/mem031.
10. **Lim, K.** A numerical study on the characteristics of flow field, temperature and concentration distribution according to changing the shape of separation plate of kitchen hood system / *K. Lim, C. Lee* // *Energ. Buildings*. — 2008. — Vol. 40. — P. 175–184. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.02.028.
11. **Logachev, K. I.** A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods / *K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova, A. K. Logachev* // *Energy Build.* — 2018. — Vol. 173. — P. 58–70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.036.
12. **Pinelli, M.** A numerical method for the efficient design of free opening hoods in industrial and domestic applications / *M. Pinelli, A. Suman* // *Energy*. — 2014. — Vol. 74. — P. 484–493.
13. **Logachev, K. I.** A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods / *K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova* // *J. Build. Eng.* — 2020. — Vol. 29. — Article № 101159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobte.2019.101159.
14. **Logachev, K. I.** On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet / *K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova* // *Build. Environ.* — 2019. — Vol. 151. — P. 338–347. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.039.
15. **Зиганшин, А. М.** Повышение энергоэффективности вентиляционного фасонного элемента в виде внезапного расширения / *А. М. Зиганшин, Т. А. Наумов* // *Изв. вузов. Строительство*. — 2019. — № 6. — С. 53–65.
16. **Зиганшин, А. М.** Численное определение характеристик течения через последнее боковое отверстие в воздуховоде / *А. М. Зиганшин, К. Э. Батрова, Г. А. Гимадиева* // *Изв. вузов. Строительство*. — 2018. — № 7. — С. 53–65.
17. **Зиганшин, А. М.** Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние / *А. М. Зиганшин, Л. Н. Бадькова* // *Изв. вузов. Строительство*. — 2017. — № 6. — С. 41–48.
18. **Logachev, K. I.** Experiment determining pressure loss reduction using a shaped round exhaust hood / *K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, E. N. Popov, O. A. Averkova, O. S. Kryukova, A. B. Gol'tsov* // *Building and Environment*. — 2021. — Vol. 190. — Article № 107572. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107572.
19. **Павлов, Н. Н.** Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха / *Н. Н. Павлов, Ю. И. Шиллер* (ред.). — М.: Стройиздат, 1992. — 172 с.
20. **Белов, С. В.** Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование / *С. В. Белов, А. Ф. Козьяков, О. Ф. Партолин* [и др.]; под ред. С. В. Белова. — М.: Машиностроение, 1989. — 368 с.
21. **Figueroa, C. E.** Hood entry coefficients of compound exhaust hoods / *C. E. Figueroa* // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. — 2011. — Vol. 8, № 12. — P. 740–745, DOI: 10.1080/15459624.2011.628605.
22. **Лифанов, И. К.** Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент в математической физике, аэродинамике, теории упругости и дифракции волн / *И. К. Лифанов*. — М.: Янус, 1995. — 520 с.
23. **Гоман, О. Г.** Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / *О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ*; под ред. М. И. Ништа. — М.: Машиностроение, 1993. — 288 с. ■

Получено 22.02.22

© О. А. Аверкова, К. И. Логачёв, Т. А. Козлов, Е. Н. Попов, 2022 г.