

Д. т. н. **О. Н. Зайцев**¹, д. т. н. **К. И. Логачев**² (✉), к. т. н. **А. Б. Гольцов**²

¹ ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

² ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», Белгород, Россия

УДК 533.6:628.5

УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ ЗАХВАТА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ МЕСТНЫМ ОТСОСОМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ. Часть 1. Методы исследования

Для улавливания загрязняющих веществ во многих зданиях и сооружениях необходимо применение местных отсосов. Один из критериев эффективности местного отсоса — скорость захвата загрязняющих веществ предлагается повысить за счет воздействия закрученной кольцевой струи и возникновения обратного потока воздуха. Круглый отсос помещается соосно во внешний цилиндрический кожух, в котором происходит закрутка воздушного потока за счет тангенциального подвода в кожух двух приточных струй. Образуется вихревой купол, способствующий повышению эффективности такого вихревого отсоса. Экспериментально и численно исследовано изменение осевой скорости воздуха при удалении от вихревого отсоса для 11 конструкций, в каждой из которых задавались 4 разных отношения расходов всасываемого и приточного воздуха. В исследованных вариантах применения предложенных отсосов скорость существенно возрастает на определенном диапазоне удаленности от них. Определено сочетание конструктивно-режимных параметров, способствующих наибольшей скорости захвата вихревым отсосом. Полученные результаты полезны при проектировании эффективных отсосов для улавливания загрязняющих веществ.

Ключевые слова: местная вентиляция, вытяжное устройство, эффективность улавливания, закрученные течения, вихревой отсос.

ВВЕДЕНИЕ

Применение местной вытяжной вентиляции является наиболее эффективным, но и энергозатратным способом локализации пылегазовых выбросов [1]. Одним из направлений снижения энергозатрат является повышение скорости захвата местного отсоса. При увеличении скорости захвата всасываемого воздушного потока можно снизить расход удаляемого воздуха и уменьшить тем самым затраты на поддержание требуемой чистоты воздуха в помещении.

В частности, повышение скорости захвата возможно при помощи воздушно-струйного экранирования [2, 3] или активирования. В

статье [4] исследовали эффективность активирования бортового отсоса приточной воздушной струей. Была определена рациональная высота вытяжного канала. Воздушная завеса использована для повышения эффективности местной вентиляции полузакрытого типа в работе [5]. При помощи струйного горизонтального течения повышена на 40–60 % эффективность захвата местных отсосов от мощных тепловых источников литейных цехов [6]. Для сварочных работ подобного эффекта также удалось добиться в работе [7]. Экранирование щелевого отсоса приточной струей, истекающей из торцов раструба, осуществлено в статье [8], в которой исследовали влияние угла наклона раструба на дальность захвата отсоса. Показано, что экранирование щелевого отсоса позволит повысить дальность захвата отсоса в 2–3 раза [9]. Для круглых отсосов-раструбов также подтверждена эффективность воздушно-струйного экранирования [3]. В работах [10, 11] показана целесообразность воздушно-струйного экранирования круглого



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

отсоса-раструба с фланцем (угол наклона полки раструба к оси отсоса 90 град) турбулентной радиальной струей, истекающей из торца раструба.

Использование для экранирования закрученных струй позволяет еще больше повысить дальность захвата местных отсосов. В статьях [12, 13] исследовали такой же местный отсос, что и в статьях [10, 11], но экранированный коаксиальной кольцевой закрученной струей. Показана большая эффективность такого экранирования относительно прямоточной струи. В работах [14, 15] для повышения дальности захвата отсоса использовали эффект торнадо, создаваемый четырьмя компактными струями, что позволило эффективно улавливать мощные потоки загрязненного воздуха. Система таких активированных отсосов, используемых в протяженном помещении, рассмотрена в статье [16]. Компактные струи для создания эффекта торнадо использовали значительно ранее в публикациях [17, 18] для повышения эффективности локализации крупных тепловых объектов в литейных цехах. Доказано, что расход отсасываемого воздуха можно снизить на 50 %.

Для локализации загрязняющих веществ от компактных источников их образования использовали кольцевые закрученные струи [2]. В статье [19] численно и при помощи экспериментальной визуализации рассматривали отсос, экранированный соосной ему кольцевой закрученной струей. Использовали тор и эффект Коанда для повышения эффективности отсоса. Показано существенное увеличение скорости захвата местным отсосом. В статье [20] также исследовали вихревой отсос, рассмотрены разные расходы отсасываемого и приточного воздуха при изменении интенсивности закрутки кольцевой коаксиальной отсосу закрученной струи. Показано существенное увеличение дальности и скорости захвата местного отсоса, экранированного закрученной струей. В статье [21] исследовали отсос, экранированный коаксиальной закрученной кольцевой струей при помощи натурного эксперимента. Оригинальный подход к созданию закрученного течения вблизи отсоса продемонстрирован в статье [22]. Для повышения эффективности захвата отсоса использовали вращающийся кольцевой диск, установленный соосно всасывающему отверстию. Закрученный поток, образующийся в результате вращения диска, также увеличивает дальность захвата отсоса. Исследования по рассмотрению влияния направленности и условий формирования внешней закрученной струи с образованием осевой области пониженного давления и обратных токов показывают перспективность

применения вихревой вентиляции. В частности, представляет интерес создание компактных вихревых отсосов.

Цель настоящей работы — определение рациональных конструктивно-режимных характеристик компактных вихревых отсосов, способствующих увеличению скорости захвата загрязняющих веществ круглым отсосом, экранированным соосной кольцевой приточной струей, путем экспериментального и численного определения влияния условий формирования внешней коаксиальной сильно закрученной струи и ее взаимодействия со всасывающим потоком воздуха. Представляет также интерес получить достоверные эмпирические данные для последующей разработки компьютерных моделей, позволяющих проводить с достаточной степенью достоверности дальнейшие исследования вихревых отсосов.

КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕВЫХ МЕСТНЫХ ОТСОСОВ

Рассмотрен вихревой отсос (рис. 1), состоящий из внутреннего круглого патрубка, из которого отсасывается воздух со скоростью v_0 , которая в процессе эксперимента варьируется путем изменения диаметра всасывающего патрубка, подключенного к вентилятору. Диаметр меняется с помощью насадки-переходника с 32 мм на D , равный 18, 12 и 6 мм. Толщина стенок патрубка 2 мм. Вытяжной патрубок содержится в соосном цилиндре с толщиной стенок 2 мм (кожух), в который тангенциально подводится воздух двумя струями со скоростью $v_i = 15,92$ м/с. Верхняя часть кожуха закрыта крышкой, нижняя открыта, из нее истекает закрученная воздушная струя. Разные схемы формирования взаимодействия внешней закрученной струи и осевого всасывания показаны на рис. 2 и 3.

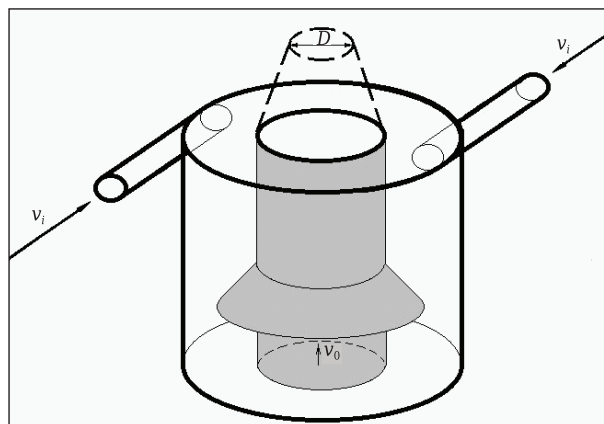


Рис. 1. Схема вихревого местного отсоса

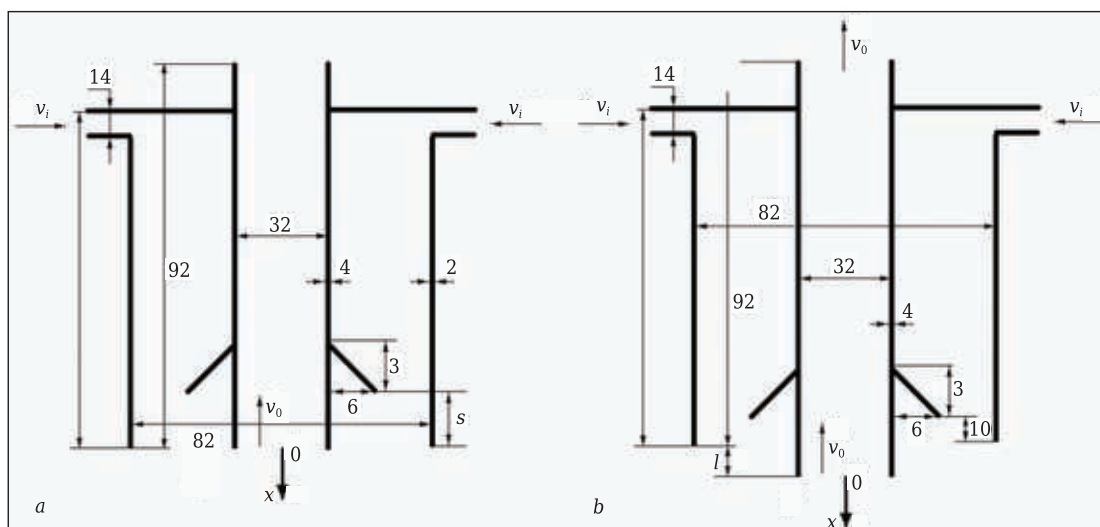


Рис. 2. Схемы вихревых отсосов с отражателем на всасывающем патрубке: а — $s = 20$ мм (схемы 1–4), $s = 10$ мм (схемы 5–8); $s = 0$ (схемы 9–12); б — $l = 10$ мм (схемы 13–16); $l = 20$ мм (схемы 17–20)

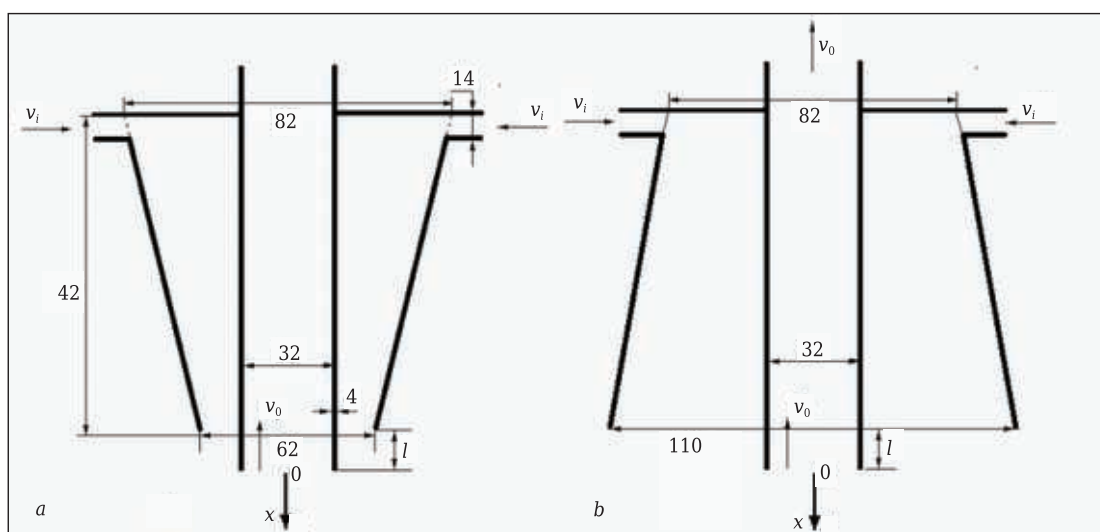


Рис. 3. Схемы вихревых отсосов: а — с сужающимся внешним кожухом, $l = 0$ (схемы 21–24), $l = 10$ мм (схемы 25–28), $l = 20$ мм (схемы 29–32); б — с расширяющимся внешним кожухом, $l = 0$ (схемы 33–36), $l = 10$ мм (схемы 37–40), $l = 20$ мм (схемы 41–44)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 4. Расстояние от низа отсоса до горизонтальной плоскости (пола) составляло 320 мм. Визуализацию воздушного потока осуществляли при помощи дыма, образованного нагревом раствора 80 % дистиллированной воды с добавлением 15 % глицерина и 5 % этилового спирта (рис. 5), что позволило оценить длину области всасывания отсоса, на которой осевая скорость воздушного потока направлена к отсосу. Замеры скорости и температуры воздуха по всей области выполнены с помощью

многофункционального прибора Testo 480. Общая инструментальная ошибка эксперимента не превышала 5 %.

МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Вычислительный эксперимент проводили в среде Solidworks Flow Simulation. В математической модели заложены уравнения неразрывности движения, замкнутые при помощи k - ε -модели турбулентности с интенсивностью 0,1 % и масштабом турбулентности 0,002 м. Уравнения решали на неструктурированных адаптированных к телу прямоугольных сетках. Вычислительный эксперимент дублировал натурный

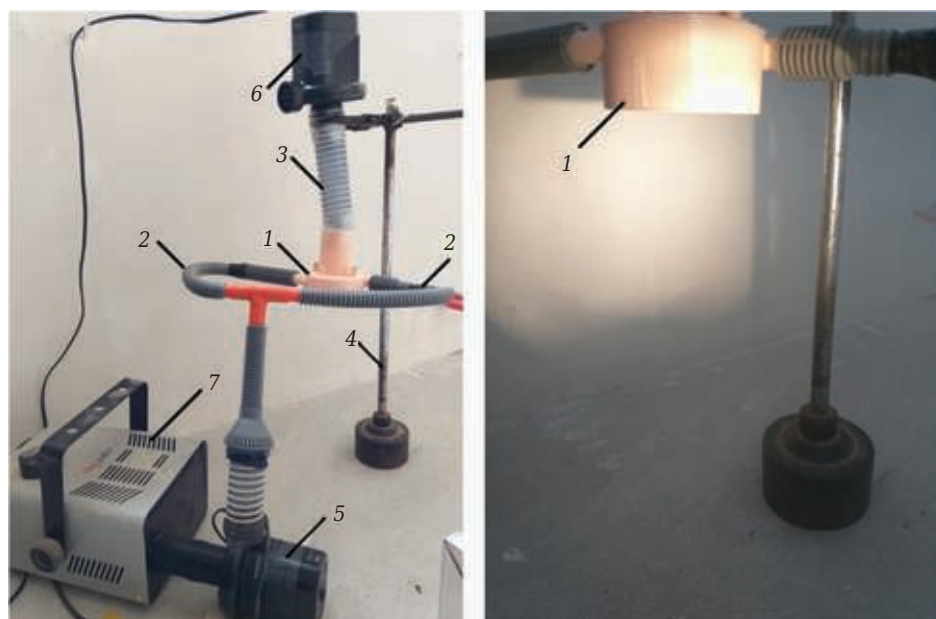


Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 — вихревой отсос; 2 — шланги для тангенциальной подачи воздуха; 3 — вытяжной патрубок; 4 — штатив; 5, 6 — вентилятор с расходом 0,01 кг/с, модель AP620-III 220-240 V 50 Hz, 100 W, Intex (Китай); 7 — аппарат для производства дыма (визуализация закрученной струи)

эксперимент. Для выполнения вычислительного эксперимента в среде SolidWorks были построены 11 пространственных твердотельных моделей активированного отсоса и задана расчетная область моделирования. В качестве граничных условий приняты расходы приточного и отсасываемого воздуха. Приток воздуха осуществлялся через два патрубка со скоростью 15,92 м/с. Удаление воздуха осуществлялось со скоростью, определенной в ходе натурных экспериментов.

В ходе вычислительного эксперимента осуществляли верификацию расчетной сетки и валидацию результатов натурного и вычислительного экспериментов. Верификация расчетной сетки происходила в следующей последовательности: построение и выбор математической модели, выбор контрольных параметров (V_t , V_x), выбор начальной сетки, моделирование с последующим измельчением расчетной сетки, анализ полученных результатов, выявление уровня адаптации сетки, при котором оказывается незначительное влияние на контрольные параметры. При валидации проводили сопоставление полученных численных значений скорости V_x/V_0 с результатами натурного эксперимента.

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение результатов натурного и численного эксперимента проводили с использованием коэффициента корреляции Пирсона, который позволяет определить степень линейной связи между исследуемыми переменными. Для выяв-



Рис. 5. Визуализация воздушного течения вблизи вихревого отсоса

ления эффектов влияния факторов F , Q_{in}/Q_{out} , C , l на функцию отклика V_{av} было получено уравнение множественной регрессии. Для проверки адекватности полученных уравнений регрессии проводили оценку коэффициентов детерминации, критерия Фишера, а также значимости полученных уравнений. Из полученного уравнения определяли значение отклика V_{av} для любой комбинации исследуемых факторов F , Q_{in}/Q_{out} , C , l . Профиль предсказания для зависимой пере-

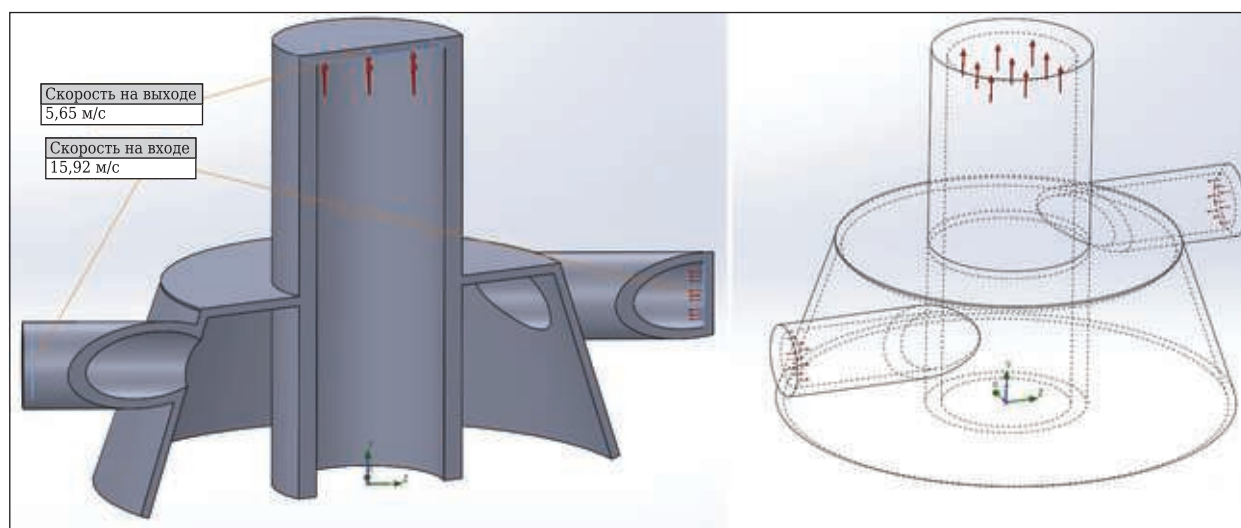


Рис. 6. Граничные условия вычислительного эксперимента

менной (отклика) включал в себя несколько графиков предсказанных значений зависимой переменной по одному на каждый фактор при других значениях факторов, равных константе на заданных уровнях. При выборе факторов на заданных уровнях по профилю предсказания определяли уровни факторов с наиболее желательным значением отклика зависимой переменной.

В общем виде проводимая оптимизация включает в себя два этапа: первый — нахождение адекватной модели (уравнение регрессии),

как функцию уровней факторов; второй — определение оптимальных уровней независимых переменных (факторов) для обеспечения максимального значения зависимой переменной.

* * *

Исследования выполнены в рамках грантов Президента РФ для ведущей научной школы НШ-25.2022.4 (создание методики исследования), Российского научного фонда № 23-49-00058 и NSFC № 5221101677 (численно-экспериментальное исследование вихревых течений).

Библиографический список

1. **Посохин, В. Н.** Аэродинамика вентиляции / В. Н. Посохин. — М. : Авок-Пресс, 2008. — 212 с.
2. **Zaytsev, O. N.** Processes of precession and nutation in swirling interacting gas jets / O. N. Zaytsev, N. V. Tsopa, N. A. Stepancova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering this link is disabled. — 2018. — Vol. 463, № 3. — Article № 032053. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032053.
3. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova. — Boca Raton, CRC Press, 2015. — 564 p. <https://doi.org/10.1201/b18488>.
4. **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. <https://doi.org/10.1002/ep.10287>.
5. **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. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mem031>.
6. **Kulmala, I.** Local ventilation solution for large, warm emission sources / I. Kulmala, P. Hynynen, I. Welling [et al.] // Ann. Occup. Hyg. — 2007. — Vol. 1, № 1. — P. 35–43. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mel049>.
7. **Iwasaki, T.** Some engineering countermeasures to reduce exposure to welding fumes and gases avoiding occurrence of blow holes in welded material / T. Iwasaki, Y. Fujishiro, Y. Kubota [et al.] // Industrial Health. — 2006. — Vol. 43. — P. 351–357. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.351>.
8. **Wen, X.** The numerical modelling of a two-dimensional local exhaust system associated with an inclined jet flow / X. Wen, D. B. Ingham, B. Fletcher // J. Eng. Math. — 2002. — Vol. 43. — P. 367–384. <https://doi.org/10.1023/A:1020328305459>.
9. **Kulmala, I.** Experimental validation of potential and turbulent flow models for a two-dimensional jet enhanced exhaust hood / I. Kulmala // AIHAJ 61. — 2000. — P. 183–191. <https://doi.org/10.1080/15298660008984527>.
10. **Hunt, G. R.** Long range exhaustion — a mathematical model for the axisymmetric air flow of a local exhaust ventilation hood assisted by a turbulent radial jet / G. R. Hunt, D. B. Ingham // Ann. occq. Hyg. — 1996. — Vol. 40, № 2. — P. 171–196. [https://doi.org/10.1016/0003-4878\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0003-4878(95)00065-8).
11. **Saunders, C. J.** Jet enhanced local exhaust ventilation / C. J. Saunders, B. Fletcher // Ann. occup. Hyg. — 1993. — Vol. 37, № 1. — P. 15–24. <https://doi.org/10.1093/annhyg/37.1.15>.
12. **Zhao, R.** Comprehensive performance evaluation of a novel Aaberg exhaust system reinforced by a swirling jet / R. Zhao, H. Qian, L. Liu, X. Zheng // Building

and Environment. — 2020. — Vol. 167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106451>.

13. **Wang, P.** Characteristics study of the swirl air curtain exhaust hood / *P. Wang, T. Feng, R. Liu* // Proceedings Article published June 2010 in 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2010.5516594>.

14. **Cao, Z.** Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system / *Z. Cao, Y. Wang, H. Zhu, M. Duan* // Energy and Buildings. — 2017. — Vol. 142. — P. 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.007>.

15. **Yan, Y.** Characterisation and analysis of indoor tornado for contaminant removal and emergency ventilation / *Y. Yan, X. Li, J. Tu, P. Feng, J. Zhang* // Building and Environment. — 2019. — Vol. 164. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106345>.

16. **Cao, Z.** Flow characteristics and pollutant removal effectiveness of multi-vortex ventilation in high pollution emission industrial plant with large aspect ratio / *Z. Cao, C. Zhai, I. Wang, T. Zhao, H. Wang* // Sustainable Cities and Society. — 2020. — Vol. 54. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101990>.

17. **Кузьмин, Л. В.** Вихревая вентиляция, организованная четырьмя компактными струями / *Л. В. Кузьмин, А. М. Попова, А. С. Гуськов, Л. С. Дмитриева* // Водоснабжение и санитарная техника. — 1991. — № 2. — С. 20–22.

18. **Ивенский, В. Г.** Использование воздушных вихрей для активирования открытых местных отсосов / *В. Г. Ивенский* // Сб. НС «Теплоснабжение и вентиляция агропромышленного комплекса». — Ростов-на-Дону : РИСИ, 1988. — С. 85–92.

19. **Spotar, S. Y.** Focusing of the flow capture for local exhaust ventilation systems / *S. Y. Spotar, A. L. Sorokin* // American Journal of Applied Sciences. — 2010. — Vol. 7, № 6. — P. 732–738. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.732.738>.

20. **Gritskevich, M. S.** Numerical investigation of flow near a round exhaust channel screened by an annular swirled jet / *M. S. Gritskevich, A. K. Logachev, K. I. Logachev* // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2019. — Vol. 92, № 2. — P. 468–476. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01953-3>.

Грицкевич, М. С. Численное исследование течения вблизи круглого вытяжного канала, экранированного кольцевой закрученной струей / *М. С. Грицкевич, А. К. Логачев, К. И. Логачев* // Инженерно-физический журнал. — Т. 92, № 2. — С. 487–495.

21. **Penot, F.** Experimental study of non-isothermal diverging swirling and non-swirling annular jets with central aspiration / *F. Penot, M. D. Pavlović* // Int. J. Vent. — 2010. — Vol. 8, № 4. — P. 347–357. <https://doi.org/10.1080/14733315.2010.11683858>

22. **Lim, Y. B.** Characteristics of ventilating flow generated by a rotating swirler in a vortex vent / *Y. B. Lim, S. M. Lee, J. W. Lee* // Journal of Fluids and Structures. — 2011. — Vol. 27, № 3. — P. 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.11.015>. ■

Получено 08.03.22

© О. Н. Зайцев, К. И. Логачев,
А. Б. Гольцов, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Aluminium China 2022 — международная выставка алюминиевой промышленности

6–8 июля 2022 г. Шанхай, Китай, Shanghai New International Expo Centre (SNIEC)

Ведущая в Азии платформа для поиска, обучения, создания сетей для всей цепочки алюминиевой промышленности, охватывающая сырье, полуфабрикаты и готовую продукцию для разных отраслей применения алюминия, а также сопутствующее технологическое оборудование, аксессуары, вспомогательные и расходные материалы.

中国国际铝工业展览会
ALUMINIUM CHINA

6-8 JULY 2022 Shanghai New International Expo Centre

ALUMINIUM CHINA

www.expomart.ru