

К. т. н. **А. Б. Гольцов**, д. т. н. **К. И. Логачёв** (✉), д. т. н. **О. А. Аверкова**,
В. А. Ткаченко

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

УДК 533.6:628.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВБЛИЗИ ВЕРТИКАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО МЕСТНОГО ОТСОСА

Проведен поиск конструктивных решений для повышения эффективности улавливания местным отсосом открытого типа и снижения пылеуноса в аспирационную сеть от местного отсоса закрытого типа — укрытия за счет использования вертикально расположенного вращающегося цилиндра-отсоса. Рассмотрены отсос в виде щелевых вырезов вдоль образующей цилиндра и отсос с торца цилиндра. Предложены усовершенствования для повышения эффективности увлечения воздушного потока вращающимся цилиндром. Полученные результаты будут полезны при проектировании аспирационных укрытий с функцией пылеосадительной камеры.

Ключевые слова: местная вытяжная вентиляция, вращающийся цилиндр-отсос, распределение скоростей, поисковый эксперимент (ПИ).

ВВЕДЕНИЕ

Местные отсосы являются надежными и эффективными устройствами для улавливания и локализации пылегазовых выбросов. Работа систем местной вытяжной вентиляции сопряжена с высокими энергетическими затратами, из-за чего данные системы и технологии производства непрерывно совершенствуют [1–5]. Одним из способов повышения диапазона захвата вредностей местными отсосами открытого типа является использование искусственно созданного вихря (торнадо). В работах [6–8] для этого используют четыре приточных компактных струи, расположенных перпендикулярно оси отсоса. Использование закрученных кольцевых струй, коаксиально размещенных относительно отсоса, описано в работах [9–15]. В работе [16] вихревой поток генерируется ребристым вращающимся кольцевым диском. Сделан вывод о повышении дальности захвата местного отсоса в два раза. В статьях [17, 18] ставилась противоположная задача. Необходимо было так организовать воздушное течение в местном отсосе закрытого типа, чтобы, напротив, снизить захват пылевых частиц вытяжным патрубком, для чего

использовали вращающийся цилиндр с отсосом на боковой поверхности. Исследовали влияние диаметра цилиндра, частоты вращения, расхода отсасываемого воздуха, наличия выступов на боковой поверхности на снижение пылеуноса в аспирационную сеть [17, 18]. Цилиндр-отсос был расположен горизонтально, т. е. ось вращения была перпендикулярна вектору ускорения свободного падения. В настоящей статье предложено расположить цилиндр-отсос вертикально и исследовать различные его конструкции как на увеличение дальности захвата пылевых частиц, так и на ее снижение. Цель работы — численное определение влияния на величину максимального диаметра улавливаемых пылевых частиц конструктивного оформления вертикально расположенного цилиндра со всасывающим проемом в торце и на боковой поверхности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач в программном комплексе Solidworks с приложением COSMOSFloWorks созданы математические модели для проведения вычислительных экспериментов. Для моделирования использовали уравнения Навье – Стокса и неразрывности, замкнутые при помощи k - ε -модели турбулентности. Были созданы 15 моделей (рис. 1).

Рассматривали расчетную цилиндрическую область диаметром и высотой 1000 мм. В каче-



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

стве факторов эксперимента выбраны различные конструкции отсосов и частота вращения цилиндра-отсоса, в качестве отклика фиксировали максимальный диаметр частиц, улавливаемых отсосом, также варьировали различные граничные условия — реальную стенку, реальную вращающуюся стенку, давление окружающей среды, массовый расход на выходе (см. рис. 1). Во всех экспериментах были постоянными массовый расход воздуха 0,168 кг/с (500 м³/ч) и давление окружающей среды 101325 Па. При моделировании движения пылевых частиц принимали идеальное отражение от реальных стенок, в качестве материала пылевых частиц принята кварцевая пыль с плотностью 2200 кг/м³, частицы имеют форму шара. Пылевые частицы поступали в рассматриваемую область равномерно по всей граничной поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В поисковом эксперименте (ПИ) № 1 (рис. 2) воздух отсасывался из верхней плоскости цилиндрической области диаметром 1000 мм. Скорость всасывания 0,063 м/с согласуется с рекомендациями при проектировании аспирационных укрытий: увеличение площади отсоса, снижение скорости всасывания и концентрации уносимых частиц пыли. Максимальный диаметр d_{max} пылевой частицы оказался равным 30 мкм (см. рис. 2, б). Пылевые частицы более мелких фракций (см. рис. 2, в) улавливаются в более глубоком диапазоне рассматриваемой области, чем крупные (см. рис. 2, б).

В ПИ № 2 отсос осуществлялся из круглого отверстия диаметром $D_{вх} = 250$ мм, в ходе эксперимента диаметр частиц, уносящихся в отсос, увеличился до 50 мкм, что связано с увеличением скорости всасывания до 18,8 м/с.

В ПИ № 3 (рис. 3, б) в рассматриваемой области помещался вращающийся цилиндр с от-

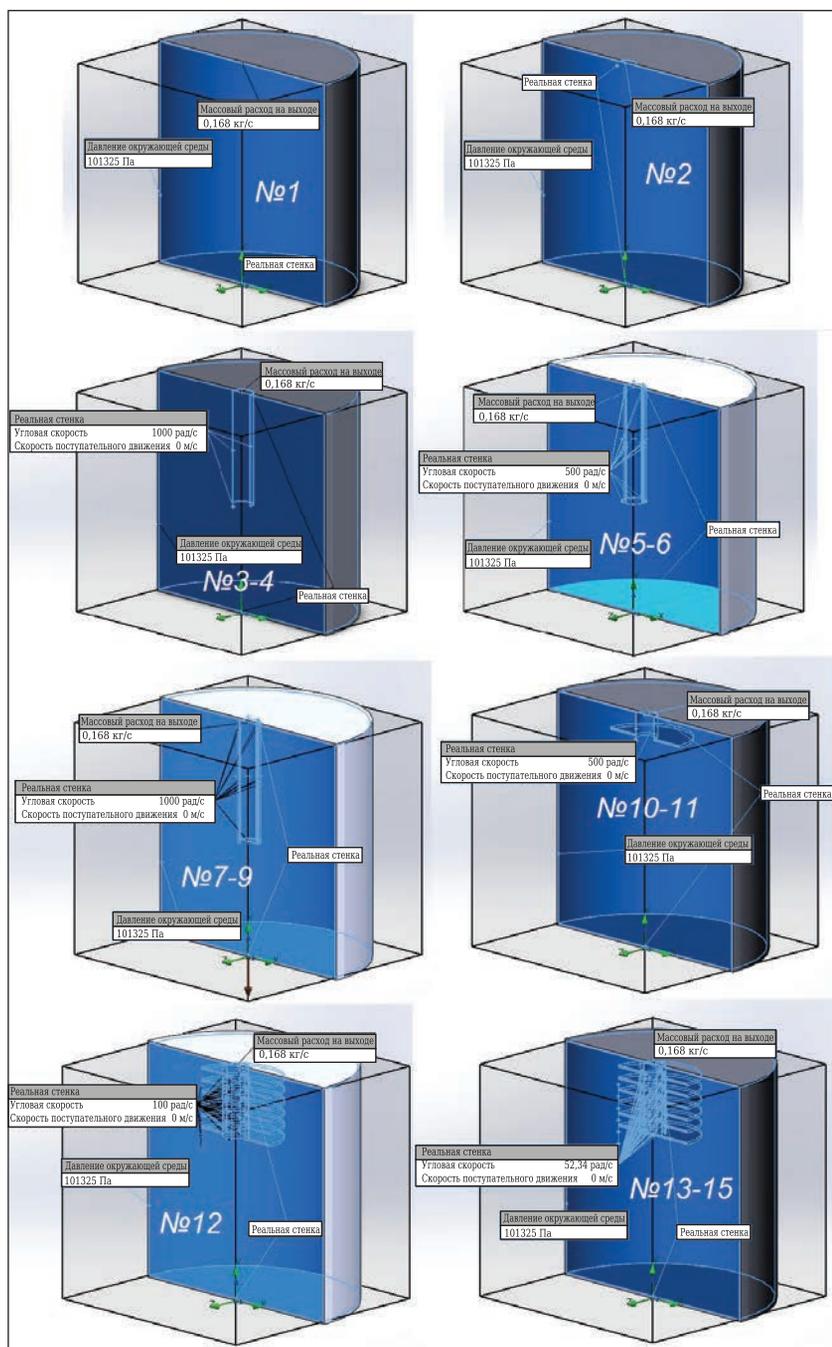


Рис. 1. Граничные условия для поисковых экспериментов

сосом в торце. Диаметр цилиндра d не изменялся для всех остальных ПИ и оставался равен 250 мм. Формирование вращающегося воздушного потока ниже цилиндра может способствовать увеличению d_{max} за счет формирования вихря, что необходимо для местных отсосов открытого типа. При частоте вращения цилиндра 100 рад/с d_{max} достигает 60 мкм (см. рис. 3, б), частицы меньших фракций улавливаются из большего объема рассматриваемой области. При увеличении частоты вращения до 1000 рад/с (рис. 3, в) d_{max} становится более 100 мкм. Заметно

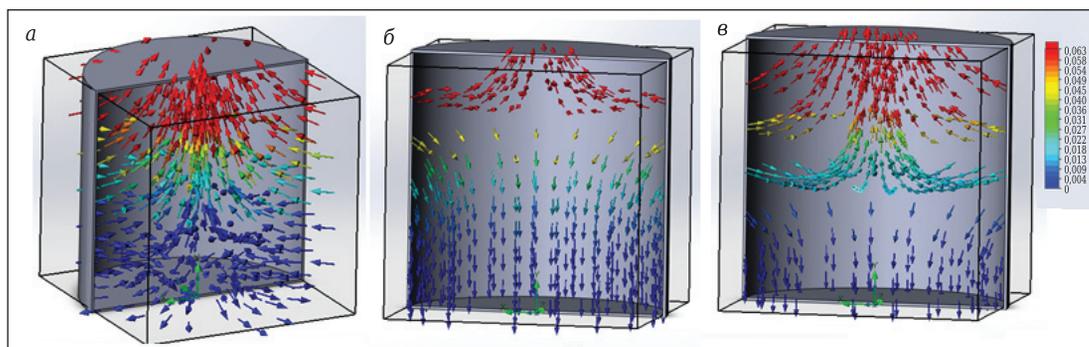


Рис. 2. Движение пылевоздушного потока к круглому всасывающему отверстию (ПИ № 1): поле скоростей (а), траектории пылевых частиц диаметром 30 (б) и 10 мкм (в)

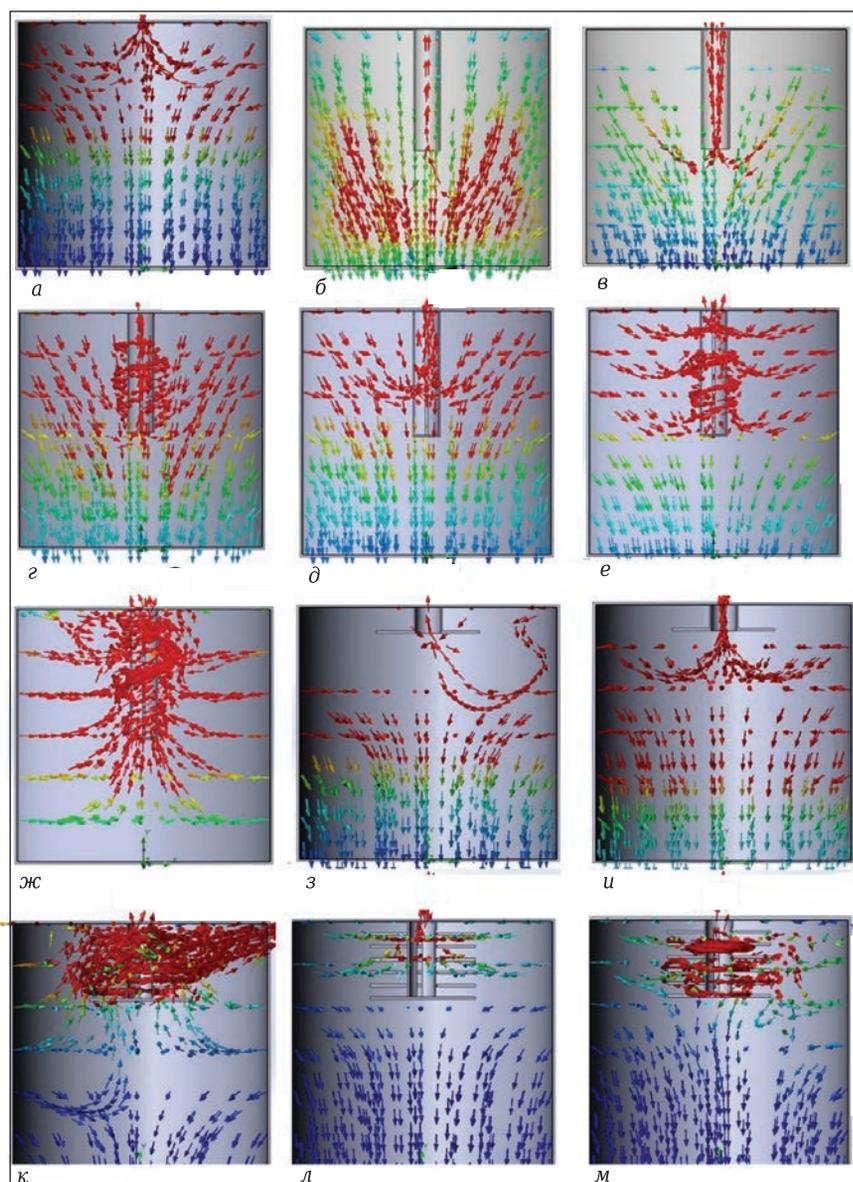


Рис. 3. Движение пылевых частиц разных диаметров в области с вращающимся цилиндром-отсосом: а — 50 мкм, ПИ № 2; б — 60 мкм, ПИ № 3, 100 рад/с; в — 120 мкм, ПИ № 4, 1000 рад/с; г — 50 мкм, ПИ № 6, 500 рад/с; д — 50 мкм, ПИ № 7, 100 рад/с; е — 30 мкм, ПИ № 8, 500 рад/с; ж — 10 мкм, ПИ № 9, 1000 рад/с; з — 50 мкм, ПИ № 10, 100 рад/с; и — 100 мкм, ПИ № 11, 500 рад/с; к — 20 мкм, ПИ № 13, 100 рад/с; л — 30 мкм, ПИ № 14, 6,28 рад/с; м — 40 мкм, ПИ № 15, 52,34 рад/с

увеличение концентрации пылевых частиц внутри цилиндрического канала и их закручивание в вихревой жгут (рис. 3, в).

При добавлении 4 щелевых отверстий и торцевой заглушки (ПИ № 7–9, рис. 3, д–ж) к цилиндру-отсосу и использовании различной частоты вращения (100, 500 и 1000 рад/с) d_{\max} уменьшается до 50, 30 и 10 мкм соответственно. Пылевые частицы диаметром 50 мкм, не вращаясь вокруг цилиндра, попадают внутрь него через щелевые отверстия (см. рис. 3, д), что объясняется невысокой частотой вращения цилиндра. При увеличении частоты вращения создается закрученный воздушный поток, вследствие центробежной силы более крупные фракции оседают. Частицы диаметрами 30 и 10 мкм закручиваются вокруг цилиндра, проникая в него через щелевые вырезы (см. рис. 3, е, ж). Для местных отсосов закрытого типа (аспирационных укрытий) такое снижение пылеуноса является положительным фактом, но основной трудностью, стоящей на пути применения его в технике пылеулавливания, является сложность конструкции в сравнении с простым отсосом большой площади. Наличие вращающихся и трущихся поверхностей в области с высокой концентрацией будет при-

Величины максимального диаметра пылевых частиц

Номер эксперимента	d_{max} , мкм	Частота вращения, рад/с	Примечание
01	30	–	Нет цилиндра отсоса
02	50	–	Диаметр отсоса $D_{вх} = 0,25$ м
03	50	100,00	Цилиндр без щелей
04	>100	1000,00	Цилиндр без щелей
05	50	100,00	С 4 щелями и без торцевой заглушки
06	50	500,00	С 4 щелями и без торцевой заглушки
07	50	100,00	С 4 щелями с торцевой заглушкой
08	30	500,00	С 4 щелями с торцевой заглушкой
09	10	1000,00	С 4 щелями с торцевой заглушкой
10	50	100,00	Цилиндр с 1 торцевым диском
11	100	500,00	Цилиндр с 1 торцевым диском
12	80	100,00	Цилиндр с 6 дисками без торцевой заглушки
13	20	100,00	Цилиндр с 6 дисками с торцевой заглушкой
14	30	6,28	Цилиндр с 6 дисками с торцевой заглушкой
15	40	52,34	Цилиндр с 6 дисками с торцевой заглушкой

водить к интенсивному износу и забиванию пылью имеющих неплотностей.

Использование дисков, прикрепленных к цилиндру-отсосу ПИ № 10–15 (рис. 3, з–м), позволяет вращать цилиндр-отсос на малых оборотах и при этом достаточно эффективно раскручивать поток. Это объясняется большей площадью контакта вращающейся поверхности с воздухом. При наличии одного диска, установленного на входе в отсос, и увеличении частоты вращения от 100 до 500 рад/с максимальный диаметр уловленной частицы возрастает от 50 до 100 мкм (рис. 4), что объясняется искусственно создаваемым торнадо, повышающим эффективность всасывания [16]. Данное явление возможно использовать для открытых местных отсосов. При добавлении шести дисков и четырех торцевых щелей эффективность раскрутки воздуха еще более возрастает и позволяет повысить величину максимального диаметра частицы от 50 мкм для одного диска до 80 мкм при частоте вращения 100 рад/с.

При перекрытии торцевого отсоса (см. рис. 3, к–м) максимальный диаметр уловленной частицы падает с 80 до 20 мкм при одной и той же частоте вращения (100 рад/с). При снижении частоты вращения цилиндра максимальный диаметр уносимых частиц возрастает, но при частоте вращения 6,28 рад/с диаметр уносимых частиц равен 30 мкм, а при 52,34 рад/с — 40 мкм. Столь небольшое отличие объясняется потерей энергии частиц при столкновении с вращающимися дисками. Наблюдается скопление частиц на поверхности дисков (см. рис. 3, м). При враще-

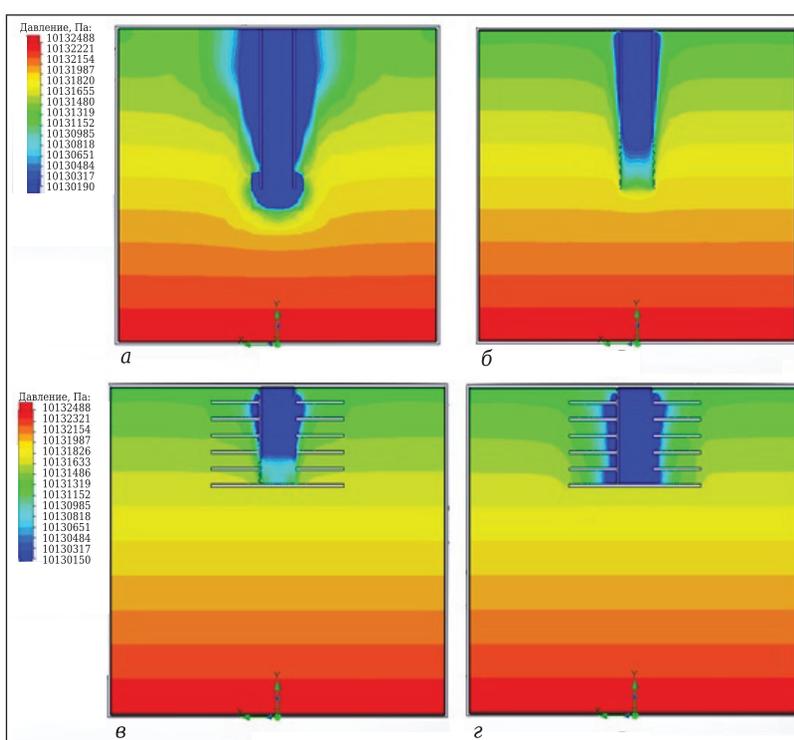


Рис. 4. Распределение давлений при работе вращающегося цилиндра-отсоса: а — ПИ № 4, 1000 рад/с; б — ПИ № 5, 100 рад/с; в — ПИ № 14, 6,28 рад/с; г — ПИ № 15, 52,34 рад/с

нии цилиндра-отсоса с частотой 6,28–100 рад/с и d_{max} равном 20–40 мкм, результаты сопоставимы с экспериментом № 1, в котором отсутствовал цилиндр-отсос. Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблице. При увеличении частоты вращения цилиндра давление вблизи него падает (см. рис. 4), что объясняется повышением скорости вращения воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наименьший пылеунос наблюдается при использовании четырех продольных щелевых отверстий на боковой поверхности цилиндра с частотой вращения 1000 рад/с. Максимальный диаметр

пылевой частицы, улавливаемой отсосом, снижается до 10 мкм. Однако при снижении скорости вращения в 10 раз и использовании 6 дисков можно получить d_{\max} , равный 20 мкм. Наибольший пылеунос достигается при использовании вращающегося с частотой 1000 рад/с цилиндра с торцевым отсосом, без оборудования цилиндра дисками. Снижение частоты вращения в два раза и использование одного диска, установленного на входе в отсос, позволит получить практически аналогичный результат.

Установлено, что увеличение скорости вращения воздушного потока при снижении частоты вращения цилиндра-отсоса достижимо за счет использования дисков. Вертикальное расположение цилиндра-отсоса является эффективным кон-

структивным решением для снижения пылеуноса в аспирационную сеть вследствие вращения частиц вокруг цилиндра-отсоса и их осаждения под действием сил тяжести. Использование отсоса с большой площадью всасывания приводит к снижению максимального диаметра частиц, уносимых в сеть, но данное увеличение ограничивается технологическими параметрами. Проведенная серия поисковых экспериментов расширяет перспективу применения вращающегося цилиндра-отсоса, предложены новые конструктивные решения для повышения эффективности работы местных отсосов закрытого и открытого типа.

* * *

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10025).

Библиографический список

1. **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. — 576 p.
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.
3. **Jeong, S. H.** A Study on the improvement of ventilation rate using air-flow inducing local exhaust ventilation system / S. H. Jeong, H. M. Kwon, S. J. Ahn [et al.] // J. Asian Architect. Build. — 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.
5. **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 [at al.] // Environ. Prog. — 2008. — Vol. 27, № 3. — P. 405–411.
6. **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.
7. **Сао, 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.
8. **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.
9. **Penot, F.** Experimental study of non-isothermal diverging swirling and non-swirling annular jets with central aspiration / F. Penot, M. D. Pavlović // International Journal of Ventilation. — 2010. — Vol. 8, № 4. — P. 347–357.
10. **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.
11. **Зайцев, О. Н.** Усовершенствование процессов удаления вредных закрученными потоками от нефисированных тепловых источников : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 Одесский национальный политехнический университет. Одесса. 1996. — 16 с.
12. **Зайцев, О. Н.** Системы локализации нестационарных тепловых источников на основе аэродинамики закрученных потоков : монография / О. Н. Зайцев, С. Л. Донченко, В. В. Витюков. — Одесса : ТЕС, 2006. — 181 с.
13. **Зайцев, О. Н.** Аэродинамика закрученных газовых потоков с прецессирующим вихревым ядром в теплоэнергетике : монография, научное издание к 50-летию НАПКС / О. Н. Зайцев. — Симферополь : СОНАТ, 2009. — 204 с.
14. **Ивенский, В. Г.** Совершенствование систем аспирации на основе использования вихревого эффекта : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 11.00.11 Науч. центр. высшей школы. Ростов-на-Дону, 1991. — 19 с.
15. **Wang, P. F.** Characteristics study of the swirl air curtain exhaust hood / P. F. Wang, T. Feng, R. H. Liu // 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE 2010), June 18–20, 2010, Chengdu, China. — P. 1–5.
16. **Lee, S. M.** A new local ventilation system using a vortex flow generated with a finned rotating annular disk / S. M. Lee, J. W. Lee // Winter Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Ashrae Transactions. — 2005. — Vol. 111, Pt. 1. — P. 149–158.
17. **Гольцов, А. Б.** Моделирование пылевоздушных течений в аспирируемом укрытии / А. Б. Гольцов, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 61–66.
18. **Gol'tsov, A. B.** Modeling dust and air flow within an aspirated shelter / A. B. Gol'tsov, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 325–331.
19. **Аверкова, О. А.** Перспективы применения цилиндра-отсоса при аспирации перегрузочных узлов / О. А. Аверкова, А. Б. Гольцов, В. А. Здесенко [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 2. — С. 154–161. ■

Получено 13.02.18

© А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, В. А. Ткаченко, 2018 г.