

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

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

УДК 533.6:628.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА, ЗАКРУЧЕННОГО ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРОМ-ОТСОСОМ

Повышение эффективности систем местной вытяжной вентиляции состоит в локализации выбросов загрязняющих веществ с минимальными затратами электроэнергии. Использование вращающегося цилиндра-отсоса в укрытии может привести к снижению пылеуноса в аспирационную сеть и затрат на транспортировку пылевых аэрозолей в воздуховодах. Проведено исследование распределения скоростей воздушного потока вблизи вращающегося цилиндра-отсоса в зависимости от частоты вращения и расхода отсасываемого воздуха. Полученные результаты могут быть применены при проектировании закрытых местных отсосов — аспирационных укрытий с функцией пылесодительной камеры.

**Ключевые слова:** местная вытяжная вентиляция, вращающийся цилиндр-отсос.

### ВВЕДЕНИЕ

**М**естные вытяжные устройства являются надежным и эффективным способом улавливания загрязняющих веществ в различных отраслях промышленности и сферах жизнедеятельности человека [1–9]. Энергоэффективность систем местной вытяжной вентиляции зависит от затрат на работу электродвигателей, сопротивления пылеулавливающего оборудования, эффективной локализации источника пылевыделения, правильности расчета и подбора всего комплекса оборудования данных систем. Наибольшей энергоэффективности можно достичь совершенствованием технологического процесса, чтобы переработка и производство не сопровождались пылевыделением, что часто затруднительно или невозможно для действующих производств. Снижение энергетических затрат в системах вентиляции при сохранении эффективности работы является одной из актуальных научных проблем. Одним из способов снижения энергозатрат на эксплуатацию систем вентиляции является использование закрученных струй. В работах [10, 11] использование искусственно созданного торнадо повышает диапазон захвата местного отсоса за счет использования кольцевой закрученной струи, в статье [12] исследуется торнадо, создаваемое четырьмя компактными струями.

В работах авторов [13–16] предлагается использовать закрученный поток для других целей. Создаваемое вращающимся цилиндром-отсосом поле скоростей препятствует попаданию пылевых частиц в вытяжное устройство. Замена аспирационного вытяжного канала в укрытии на вращающийся цилиндр-отсос позволит снизить пылеунос в аспирационную сеть, а значит, и энергозатраты на улавливание пылевых частиц. В работах [13, 14] описано численное исследование с использованием методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей динамики одиночных пылевых частиц или пылевого полифракционного облака в аспирационном укрытии, снабженном вращающимся цилиндром-отсосом. В работе [15] была учтена вязкость воздушного потока и для моделирования использовались уравнения Навье – Стокса и неразрывности, замкнутые при помощи  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности. В статье [16] описан ряд экспериментально полученных данных на лабораторной установке вращающегося цилиндра-отсоса с частотой 1000–2000 об/мин и расходом отсасываемого воздуха в диапазоне 10–50 м<sup>3</sup>/ч.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено исследование закрученных цилиндром-отсосом воздушных потоков на разработанной опытно-промышленной установке и при помощи CFD (Computational fluid dynamics) с целью выявления и анализа основных закономерностей закрутки воздушного потока цилиндром-отсосом и изучения возможных перспектив его



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

применения в условиях переработки сыпучих материалов как средства, обеспечивающего снижение пылевой нагрузки на пылеуловители системы.

Задачи исследования:

- исследовать численно и экспериментально распределение скоростей воздушного потока вблизи цилиндра-отсоса;
- проверить адекватность математической модели для вычислительных экспериментов;
- произвести анализ полученных результатов;
- разработать рекомендации по перспективам применения и дальнейшего изучения цилиндра-отсоса.

Схема опытно-промышленной установки изображена на рис. 1.

Побудитель тяги 2 создает устойчивое движение воздушной массы через щели цилиндра-отсоса 4 и далее по трубопроводам. В свою очередь, цилиндр-отсос вращается за счет работы электродвигателя 5. В ходе эксперимента осуществляется регулирование следующих параметров: расхода отсасываемого воздуха  $Q$  (до  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), частоты вращения цилиндра отсоса  $n$  (до  $1500 \text{ об/мин}$ ). В качестве измеряемой величины была принята скорость  $V_z$  и  $V_y$  в различных точках относительно цилиндра-отсоса. Система координат показана на рис. 2, измеряемые величины приведены ниже:

Измеряемый параметр	Наименование прибора
Температура, °С.....	Testo 425
Скорость воздуха, м/с.....	Testo 425
Тахометр, об/мин.....	Digital Tachometer CEM AT-8
Атмосферное давление, Па..	БАММ
Дифференциальное давление, Па.....	Testo 510

Математическая модель для проведения вычислительных экспериментов разработана в приложении COSMOS Flow Works программного обеспечения Solid Works. Модель цилиндра-отсоса (рис. 3) представляет собой открытое пространство с вращающимся в центре цилиндром-отсосом с размерами, указанными на рис. 2. В рамках модели были заданы граничные условия (см. рис. 3): объемный расход на выходе; реальная стенка (поверхность твердого тела); реальная вращающаяся стенка (поверхность вращающегося твердого тела); давление окружающей среды. Значения этих параметров аналогичны значениям измеренных приборно. Для моделирования использовались уравнения Навье – Стокса и неразрывности, замкнутые при помощи  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что увеличение скорости  $V_y$  с возрастанием числа оборотов связано с повышением расхода воздуха, втягиваемого венти-

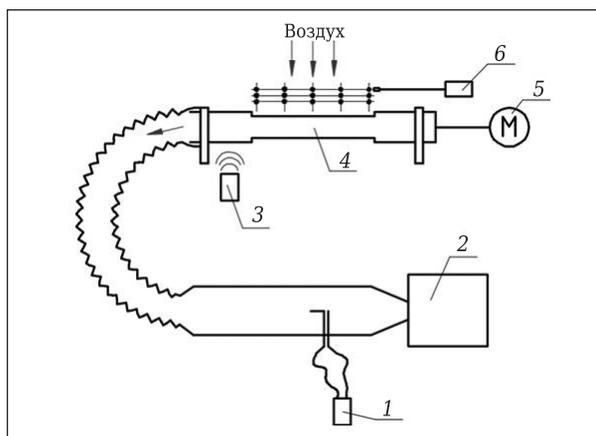


Рис. 1. Схема опытно-промышленной установки: 1 — дифференциальный манометр Testo-510; 2 — пылесос; 3 — тахометр; 4 — цилиндр-отсос; 5 — электропривод; 6 — термоанемометр Testo-425

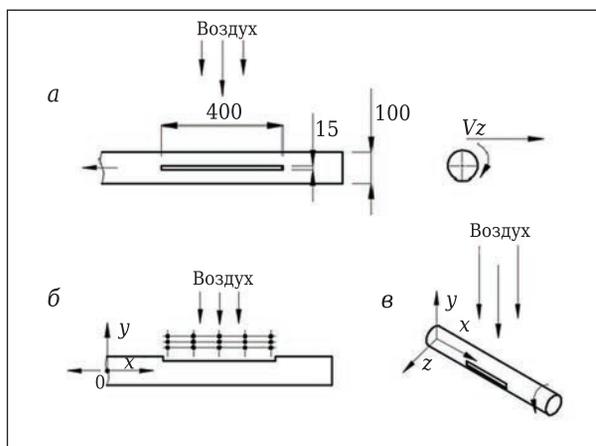


Рис. 2. Габаритные размеры исследуемого цилиндра-отсоса: а — вид на всасывающее отверстие; б — вид в плоскости  $xOy$ ; в — трехмерное изображение

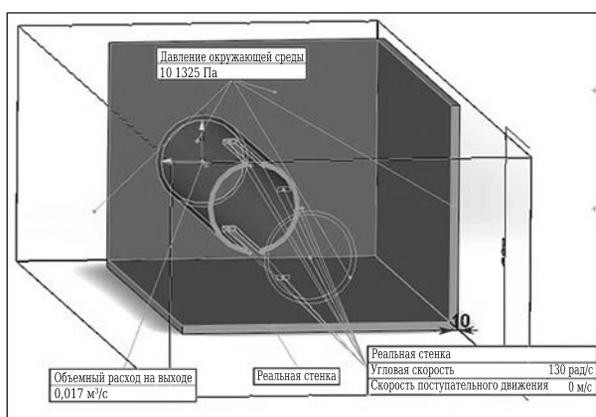


Рис. 3. Граничные условия вычислительного эксперимента

лятором, из-за снижения аэродинамического сопротивления цилиндра-отсоса (рис. 4).

Наиболее предпочтительным условием для снижения пылеуноса является максимальное значение тангенциальной составляющей ско-

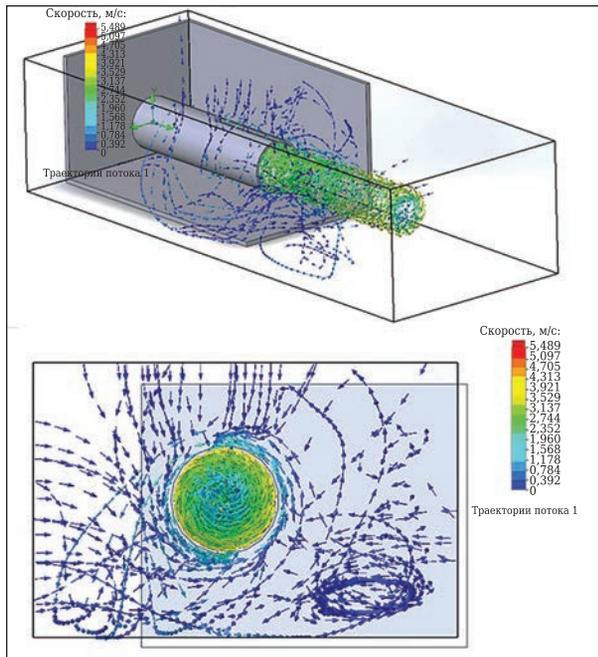


Рис. 4. Траектория движения воздуха:  $n = 130$  рад/с,  $0,017$  м<sup>3</sup>/с

рости воздуха. Уравнения регрессии, полученные для этой скорости на основании результатов экспериментов и графиков желательности,

имеют следующий вид для реального эксперимента:

$$Vz = 1,255 + 0,3E - 3n + 0,2E - 6n^2 - 98,3Q + 3160,0Q^2 + 0,8756x - 0,458x^2 - 15,3y + 110,0y^2 + 0,000nQ + 0,2E - 3nx + 17,11Qx - 0,006ny + 16,86Qy - 7,84xy;$$

для вычислительного эксперимента:

$$Vzv = -1,90 + 0,0027n - 4,07E - 7n^2 + 305,7Q - 99E^2Q^2 - 1,29x + 1,051x^2 - 14,2y + 73,77y^2 + 0,000nQ + 0,8E - 3nx - 24,4Qx - 0,020ny + 193,4Qy + 4,734xy.$$

Полученные регрессионные модели являются адекватными, коэффициент детерминации  $R^2 = 0,90$  (для  $Vz$ ),  $R^2 = 0,86$  (для  $Vzv$ ). Определены значения  $t$ -критерия Стьюдента для коэффициентов в полученных уравнениях регрессии. Наибольшее влияние на величину  $Vz$  оказывает частота вращения цилиндра-отсоса, что подтверждается оценкой эффектов, вероятность ошибки при отклонении от нулевой гипотезы составляет менее 0,05. Аналогичная ситуация отмечается и по результатам вычислительного эксперимента. На основании полученных уравнений построены профили желательности (рис. 5). Здесь факторы эксперимента:  $n$  — частота вращения, об/мин;  $Q$  — расход удаляемого возду-

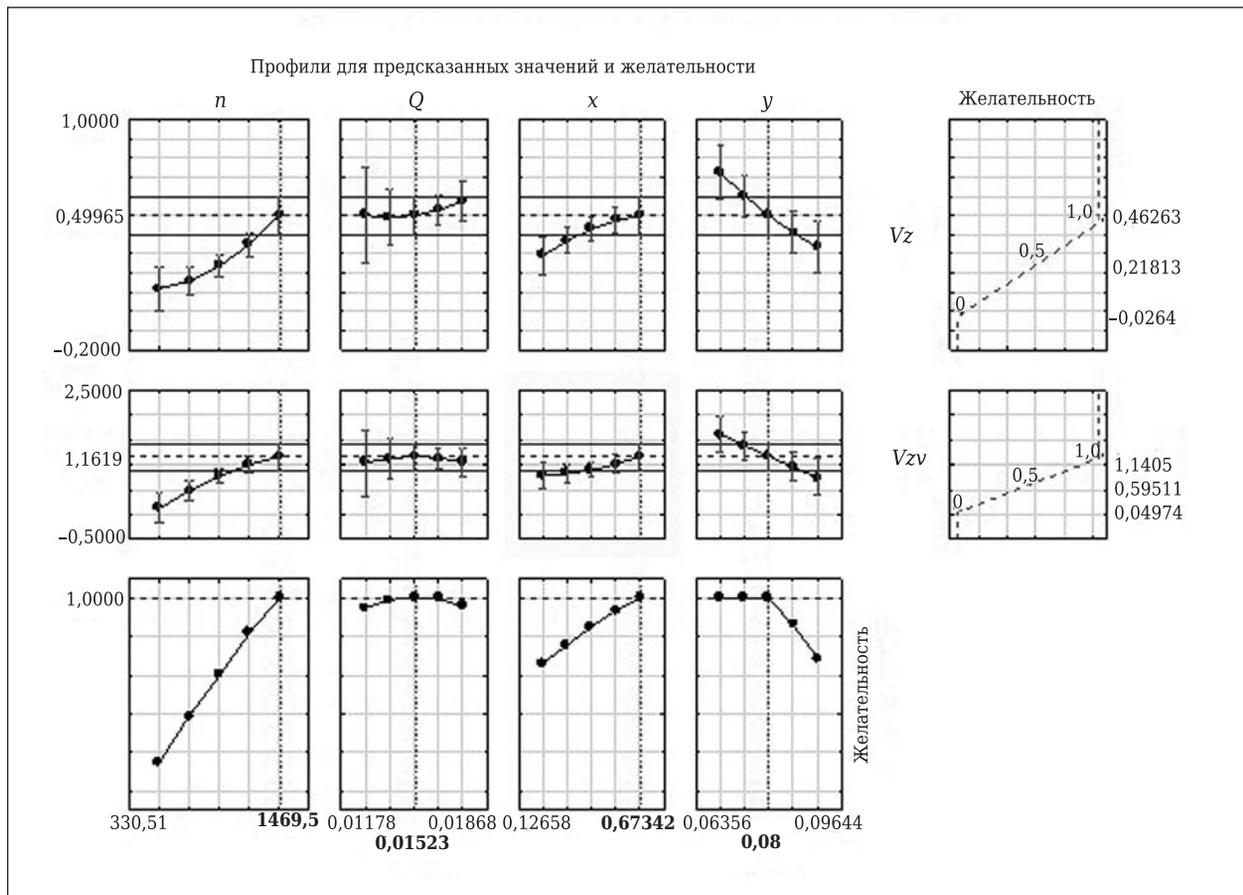


Рис. 5. Профили для предсказанных значений и желательности полученных уравнений регрессии

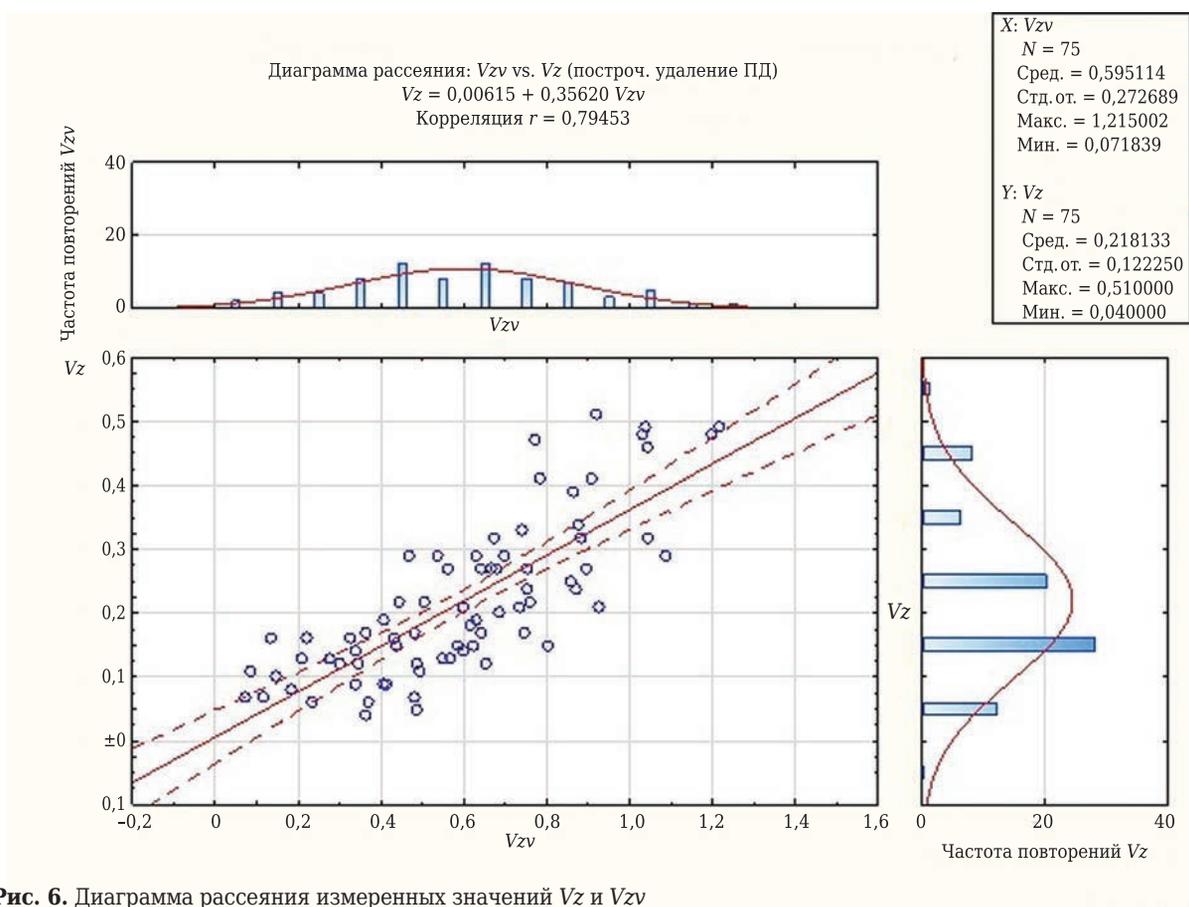


Рис. 6. Диаграмма рассеяния измеренных значений Vz и Vz<sub>v</sub>

ха, м<sup>3</sup>/с; X и Y — координаты точек, в которых производились измерения значений скорости Vz. Чем больше скорость Vz, тем выше величина центробежной силы, воздействующей на частицу, а именно это является критерием снижения пылеуноса в аспирационную сеть.

Графики (см. рис. 5) показывают, при каких значениях факторов достигается максимальное значение скорости, полученной на основании обработки результатов реального (Vz) и вычислительного (Vzv) экспериментов. Максимальное влияние на изменение скорости оказывает частота вращения, расход в исследуемом диапазоне не оказывает значительного влияния. При смещении точек измерения, находящихся на одном расстоянии от оси вращения, от центра цилиндра-отсоса к его периферии скорость Vz возрастает, что объясняется снижением влияния всасывающей щели. При удалении от оси цилиндра-отсоса скорость закрутки Vz снижается. По горизонтальной оси на рис. 5 полужирным шрифтом показаны значения n, Q, x, y, при которых достигаются максимальные значения Vz и Vz<sub>v</sub>.

В каждом из экспериментов основным фактором, оказывающим влияние на скорость закрутки воздушного потока, в рамках исследуемых диапазонов варьирования факторов является частота вращения цилиндра отсоса.

Получен коэффициент корреляции Vz и Vz<sub>v</sub>, который составил 0,794. На рис. 6 показаны результаты измерения скоростей Vz и Vz<sub>v</sub> (кружочки) при одних и тех же факторах эксперимента, сплошной линией показана линия тренда, построенная по уравнению  $Vz = 0,00615 + 0,35620Vz_v$ , пунктирной линией обозначены границы 95 % доверительного интервала данной функции. Также по осям приведены гистограммы распределения для визуальной оценки соответствия распределения включенных в анализ переменных нормальному распределению.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что увеличение частоты вращения цилиндра-отсоса повышает тангенциальную составляющую Vz скорости воздушного потока, закрученного вращающимся цилиндром-отсосом.

Из результатов более ранних исследований [15, 16] следует, что увеличение диаметра цилиндра-отсоса приводит к повышению Vz, что происходит вследствие увеличения площади контакта цилиндра с воздухом.

Повышение расхода всасываемого воздуха приводит к снижению тангенциальной составляющей скорости Vz воздушного потока и повы-

шению скорости  $V_u$  вдоль направления, перпендикулярного к оси вращения отсоса.

При вращении цилиндра-отсоса его аэродинамическое сопротивление снижается, что приводит к повышению расхода удаляемого воздуха.

Вращение цилиндра-отсоса с высокой скоростью приводит к снижению концентрации пыли в удаляемом воздухе, но значительно усложняет эксплуатацию данного устройства в укрытиях.

Сходимость вычислительного и реального эксперимента повышается с повышением точности сетки при моделировании, но качественно картина течения верна и при невысокой точности расчета.

Достоверность полученных результатов подтверждает возможность дальнейшего использования вычислительного комплекса Solid Works для конструктивного совершенствования цилиндра-отсоса и снижения пылеуноса в аспирационную сеть.

### 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.
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. **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.
4. **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 [et al.] // J. Occup. Environ. Hyg.* — 2008. — Vol. 6, № 1. — P. 42–51.
5. **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.
6. **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 [et al.] // Environ. Prog.* — 2008. — Vol. 27, № 3. — P. 405–411.
7. **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.
8. **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.
9. **Beamer, B. R.** Development of evaluation procedures for local exhaust ventilation for united states postal service mail-processing equipment / *B. R. Beamer, J. L. Topmille, K. G. Crouch // J. Occup. Environ. Hyg.* — 2004. — Vol. 1, № 7. — P. 423–429.
10. **Penot, F.** Experimental study of non-isothermal diverging swirling and non-swirling annular jets with central

Направления дальнейших исследований:

- разработка технологии закрутки воздушно-го потока при малых оборотах вращения и определение влияния угла между осью вращения и ускорением свободного падения на пылеунос;

- определение влияния избыточного давления, вызванного вращением цилиндра-отсоса, расположенного в полости укрытий, на вынос загрязняющих веществ из неплотностей или несанкционированных проемов;

- определение зависимости скорости вращения цилиндра-отсоса на аэродинамическое сопротивление входа в отсос.

\* \* \*

*Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам РФФИ (проект № 16-08-00074а) и Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В. Г. Шухова.*

aspiration / *F. Penot, M. D. Pavlović // International Journal of Ventilation.* — 2010. — Vol. 8, № 4. — P. 347–357.

11. **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.

12. **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.

13. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 4. Теоретические предпосылки создания пыле локализирующих устройств с закрученными воздушными потоками / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова [и др.] // Новые огнеупоры.* — 2014. — № 8. — С. 53–58.

**Logachev, I. N.** Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 4. Theoretical prerequisites for the creation of dust localizing devices with swirling air flows / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics.* — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 365–370.

14. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova.* — BocaRaton : CRC Press, 2015. — 576 p.

15. **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.

**Gol'tsov, A. B.** Modeling dust and air flow within an aspirated shelter / *A. B. Gol'tsov, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Refract. Indust. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 325–331.

16. **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 22.01.18

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