

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЗДУШНОГО ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКОВОГО ЦИЛИНДРА-ОТСОСА

Исследован пылевоздушный поток вблизи вертикально расположенного вращающегося цилиндра с отсосом, расположенным на боковой поверхности. Разработана компьютерная модель данного отсоса, выявлено влияние дисков, установленных на цилиндрической поверхности, на всасываемый воздушный поток и на захват частиц пыли в отсос, а также конструктивно-режимные параметры работы предлагаемого дискового цилиндрического отсоса (ДЦО), способствующие снижению пылеуноса. Установлено влияние на пылеунос размера и количества дисков, расхода аспирируемого воздуха. Данная конструкция вращающегося дискового цилиндра-отсоса может быть использована в аспирационных укрытиях с функцией пылеосадительной камеры.

Ключевые слова: местная вытяжная вентиляция, вращающийся дисковый цилиндрический отсос (ДЦО), аспирационное укрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Борьба с пылевыделением при различных технологических процессах является важной задачей, позволяющей решать проблемы снижения негативного воздействия пыли на здоровье человека, природные экосистемы и эксплуатационные характеристики оборудования, так как большое количество предприятий, построенных во второй половине 20-го века, имеют несовершенные технологические процессы переработки минерального сырья. В настоящее время ведется активная работа по совершенствованию технологических процессов и систем вентиляции [1–4], применяются передовые методы и технологии моделирования [5–9] и проектирования, позволяющие значительно ускорить и сократить процесс разработки более совершенных средств и способов борьбы с пылевыделением.

Самым эффективным и экономически целесообразным способом борьбы с пылевыделением является совершенствование технологии переработки сыпучих материалов. Связующим элементом между технологическим процессом и системами обеспыливающей вентиляции является аспирационное укрытие, модерниза-

ция которого позволит значительно сократить энергозатраты при обеспыливании. Одним из направлений повышения эффективности аспирационных укрытий является использование свойств закрученных воздушных потоков. Ранее было отмечено снижение пылеуноса при использовании вращающегося цилиндра-отсоса за счет создания закрученного потока [10–12]. Использование дисков увеличивает площадь контакта вращающейся твердой поверхности цилиндра-отсоса с воздушной массой, что позволяет увеличить скорость закрутки воздушного потока при меньшем числе оборотов.

Цель данной работы — повышение эффективности аспирационного укрытия с использованием вертикально закрученного воздушного потока при помощи дискового цилиндрического отсоса (ДЦО). Основные задачи исследования: разработка компьютерной модели ДЦО, проведение вычислительных экспериментов для выбора рациональных конструктивно-режимных параметров работы ДЦО в корпусе укрытия, а также выявление основных факторов и закономерностей, оказывающих влияние на пылеунос.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение расчетной области, модели и вычислительный эксперимент проводили в программном комплексе Solid Works Flowsimulation. В математической модели заложены уравнения неразрывности, движения и энергии, уравнения для турбулентной энергии и диссипации турбу-



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

лентности (k - ε -модель турбулентности, интенсивность 0,1 % и масштаб турбулентности 0,002 м). Уравнения решают на неструктурированных адаптированных к телу прямоугольных сетках. В эксперименте проведено моделирование движения пылевых частиц кварца плотностью 2600 кг/м³ и диаметром от 1 мкм до 100 мкм. Для выполнения вычислительного эксперимента в среде Solid Works была построена пространственная твердотельная модель ДЦО и задана расчетная область моделирования двухфазных течений. В ходе расчетов решали внешнюю газодинамическую задачу движения пылевоздушного потока в области вращающегося ДЦО с частотой 50 рад/с.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются в ранее опубликованных работах [10, 11, 13–15], в которых были приведены сопоставления с теоретическими, лабораторными и натурными экспериментами. Наблюдалась удовлетворительная качественная и количественная корреляция с абсолютным большинством достоверных и экспериментальных данных. В ходе эксперимента основной целью являлось получение качественной картины влияния вращающегося дискового цилиндра-отсоса на пылеунос.

При обработке экспериментальных данных построена функция желательности, использование которой позволяет оптимизировать различные технологические процессы. Функция строится на основании точек желательности (важная — оптимальная, средней важности и наименее желательная), двух параметров кривизны и от подогнанной функции зависимости между откликом и независимыми переменными. Построение профилей желательности включает задание функции желательности для количества уносимых частиц пыли приписыванием предсказанным значениям меток от 0 (очень нежелательно — максимальный пылеунос) до 1 (очень желательно — минимальный пылеунос). Индивидуальные значения желательности для предсказанных значений количества уносимых частиц пыли далее объединяют с помощью вычисления их геометрических средних. Исследование профилей желательности может показать, какие уровни предикторных переменных дают наиболее желаемые отклики зависимых переменных. Полученные результаты послужат основой для дальнейших экспериментов, позволят выявить факторы, влияющие на пылеунос, и разработать рекомендации, прототипы, планы экспериментов для реализации конструкции ДЦО в аспирационных укрытиях и пылеулавливающем оборудовании.

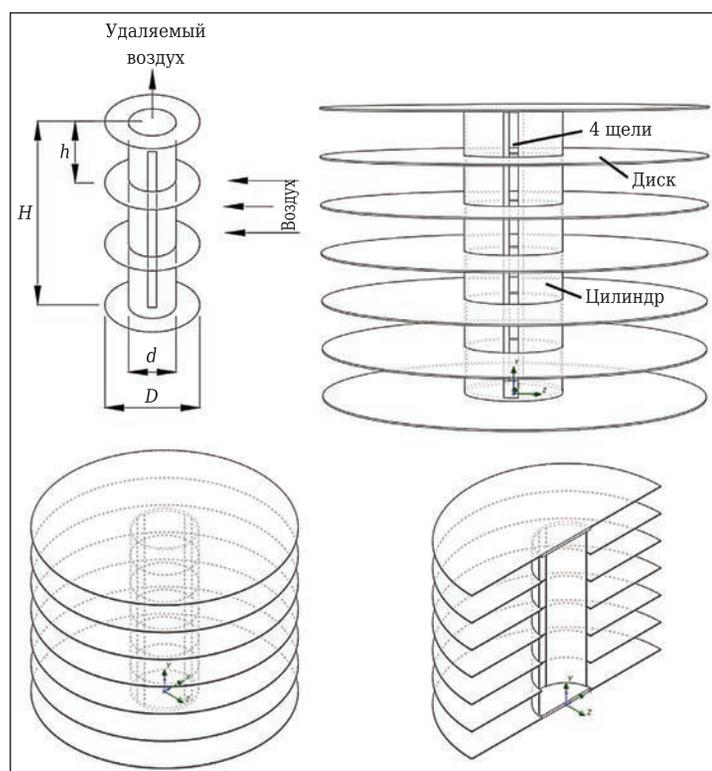


Рис. 1. Общий вид ДЦО

В ходе исследования была разработана модель ДЦО. В качестве граничных условий вычислительных экспериментов принимали непроницаемые стенки и объем удаляемого воздуха (скорость выхода). Разработанная модель представляет собой вращающийся с частотой 50 рад/с ДЦО с различным соотношением диаметров дисков d/D , количество дисков (или междисковый шаг) h/H и скорость v воздуха, удаляемого из цилиндра. Данный ДЦО располагается в свободном воздушном пространстве модели (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментов анализировали функции отклика: количество частиц, выносимых в аспирационную сеть, и дисперсный состав частиц пыли. Общее количество частиц, поступающих в расчетную область из горизонтальной плоскости, расположенной над ДЦО, составляет 1300 шт. — по 100 частиц каждой исследуемой фракции (100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 5, 2,5 и 1 мкм). Частицы пыли распределены равномерно по горизонтальной плоскости, расположенной над цилиндром. В качестве плана эксперимента принят центральный композиционный, использование которого позволяет сократить количество опытов.

В ходе экспериментов строили траектории движения пылевых частиц. На рис. 2 показаны траектории движения пылевых частиц диаме-

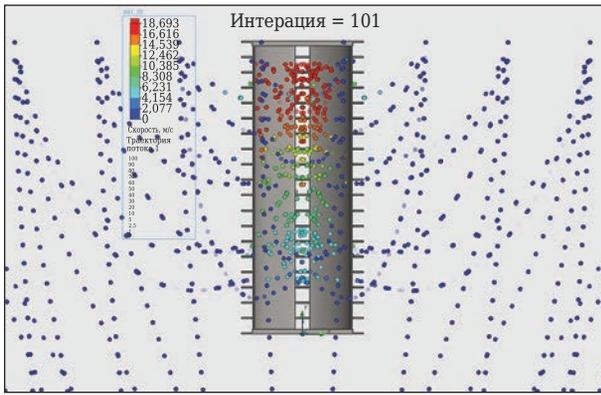


Рис. 2. Траектории движения пылевых частиц диаметром 70 мкм при $d/D = 0,8$, $h/H = 0,05$ (20 дисков), $v = 30$ м/с

тром 70 мкм, в данном опыте этот диаметр является медианным, половина частиц уносится с удаляемым воздухом. На основе полученных значений количества уносимых частиц N были построены профили (рис. 3) для предсказанных значений конструктивно-режимных параметров d/D , h/H , v . Функция желательности строилась на основе величины N . Для наглядного представления выбора оптимальных параметров построены поверхностные контуры функции желательности (рис. 4) и поверхностные контуры N от h/H и d/D (рис. 5). Полученная математическая регрессионная модель значения отклика величины N позволяет найти оптимальные значения исследуемых факторов ($d/D = 0,25$, $h/H = 0,15$, $v = 11,3$ м/с, см. рис. 3, 4).

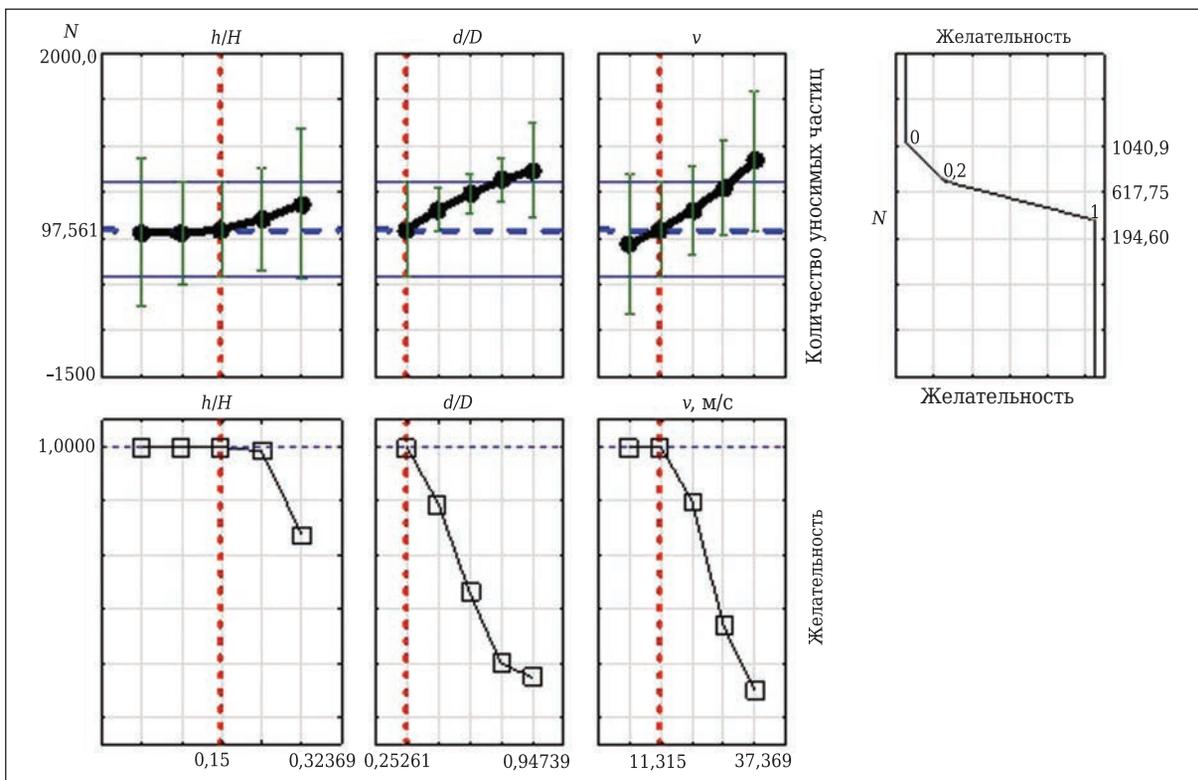


Рис. 3. Профили для предсказанных значений конструктивно-режимных параметров d/D , h/H , v и количества уносимых частиц N

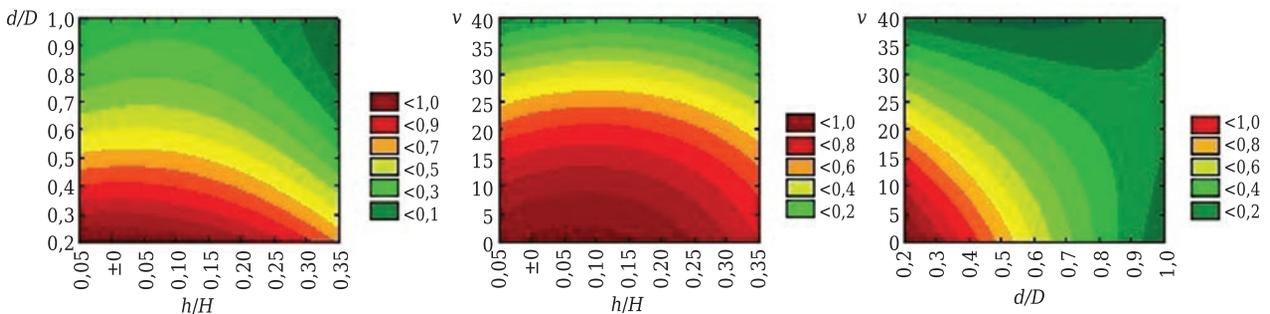


Рис. 4. Поверхностные контуры функции желательности

Установлено, что увеличение количества дисков в конструкции ДЦО приводит к снижению N . В то же время динамика убывания N незначительна. Наибольший эффект снижения N проявляется при уменьшении объема удаляемого воздуха. Это в первую очередь связано со снижением скорости удаляемого воздуха и увеличением скорости закручивания потока. Одной из основных целей является возможность создания ДЦО, вращающегося с незначительной скоростью и при этом эффективно раскручивающего поток воздуха, что положительно скажется на предотвращении уноса пылевых частиц в удаляемый воздух.

Снижение соотношения d/D приводит к увеличению скорости закрутки воздушного потока и снижению концентрации уносимых частиц. Наименьшее значение уносимых частиц (215 шт., 16,5 %) было получено при $d/D = 200/500 \text{ мм} = 0,4$, $h/H = 0,05$ (20 дисков), $v = 10 \text{ м/с}$. Наибольшее значение уносимых частиц (899 шт. 69,2 %) при $d/D = 200/250 \text{ мм} = 0,8$, $h/H = 0,25$ (4 диска), $v = 30 \text{ м/с}$. Медианный диаметр уносимых частиц в первом случае равен 10 мкм, а во втором 70 мкм. Его значения всегда коррелируют с N : если в разных экспериментах получали близкие значения N , то и величины медианных диаметров были либо равны, либо близки по значению.

На основе полученных оптимальных конструктивно-режимных параметров работы ДЦО была построена твердотельная модель

$$N = 25,4464 - 555,6459x + 1294,5886y + 3877,6781xx - 37,5xy - 547,084yy$$

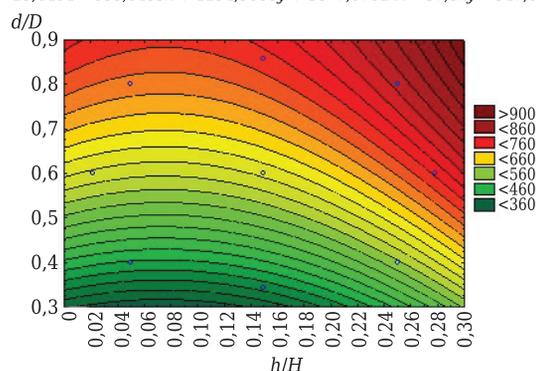


Рис. 5. Поверхностные контуры N от h/H и d/D

ДЦО и выполнен вычислительный эксперимент для проверки и сравнения полученных данных. При оптимальных конструктивно-режимных параметрах (рис. 6), полученных по функции желательности, N равно 98 шт., что достаточно хорошо согласуется с проведенным проверочным экспериментом, в котором $N = 119$ шт., а медианный диаметр уносимых частиц менее 1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные конструктивно-режимные параметры являются оптимальными в исследуемом диапазоне с точки зрения пылеуноса пылевых частиц кварца. В ходе экспериментов не учитывали влияние на энергопотребление ДЦО. В

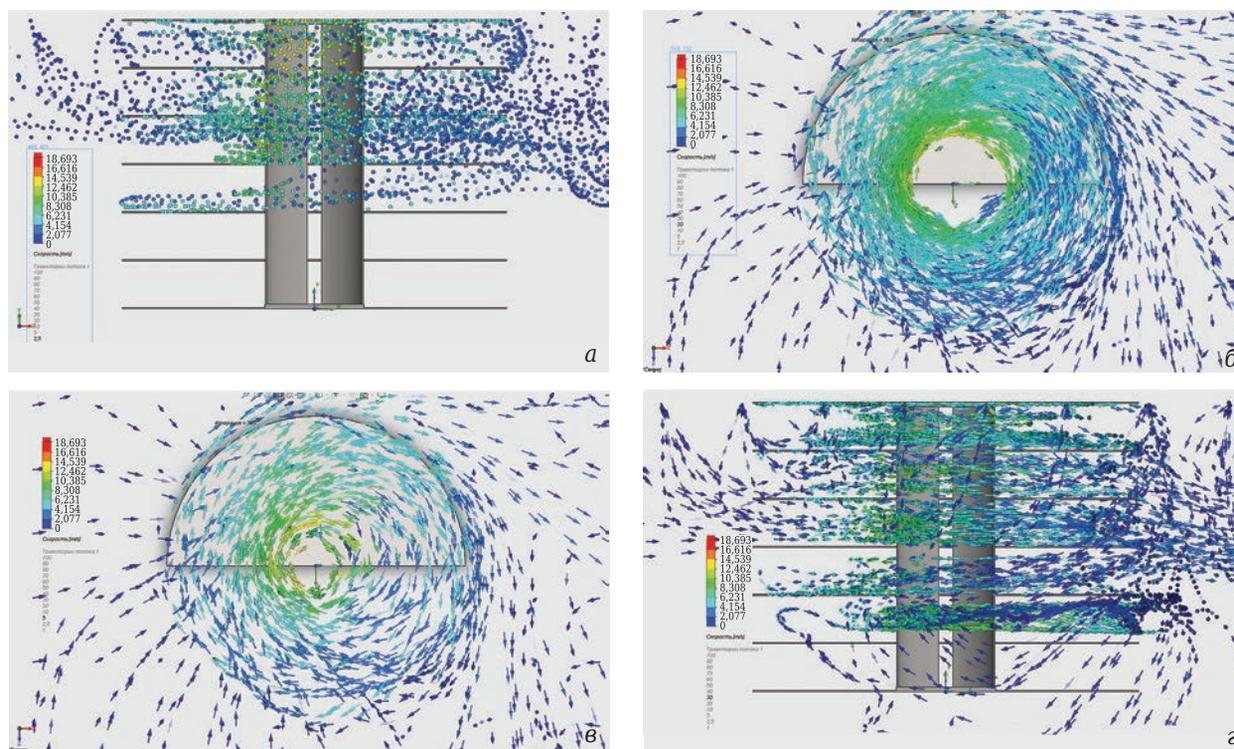


Рис. 6. Движение пылевых частиц диаметром 2,5 (а), 20 (б), 5 (в) и 30 мкм (г) при оптимальных конструктивно-режимных параметрах ($d/D = 0,25$; $h/H = 0,15$; $v = 11,3 \text{ м/с}$); б, в — вид сверху

дальнейших исследованиях необходимо уточнить область применения разработанного устройства (аспирационное укрытие, пылеуловитель, открытый отсос или др.), установить влияние вращения данного устройства на формирование избыточного давления в аспириационном укрытии, провести поиск оптимальной частоты вращения и энергопотребления ДЦО. Построены компьютерные модели ДЦО (исследуемый диапазон $d/D = 0,4-0,8$, $h/H = 0,05-0,25$, $v = 10-30$ м/с), разработан план и выполнена серия вычислительных экспериментов, выявлены оптимальные конструктивно-режимные параметры работы предлагаемого ДЦО ($h/H = 0,15$, $d/D = 0,25$, $v = 11,3$ м/с), где в качестве критерия

оптимизации выбрано минимальное количество уносимых частиц. Установлено, что на пылеунос в ДЦО значительное влияние оказывают размер и количество дисков, расход аспирируемого воздуха.

Предлагаемая конструкция вращающегося ДЦО представляет значительный интерес для дальнейших исследований, применение его возможно как в качестве пылеулавливающего устройства, так и в конструкции аспириационного укрытия.

* * *

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

Библиографический список

- 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.] // Energ. and Buildings.* — 2017. — Vol. 154. — P. 207–216.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 325–331
- Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 4. Теоретические предпосылки создания пылелокализирующих устройств с закрученными воздушными потоками / *К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, В. Н. Азаров, В. А. Уваров // 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.] // Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 365–370.
- Гольцов, А. Б.** Исследование конструкции аспириационного укрытия для применения в стесненных условиях / *А. Б. Гольцов, В. М. Киреев, А. Ю. Феоктистов // Экология промышленного производства.* — 2013. — № 1. — С. 2–5.
- Ахмедзянов, Д. А.** К вопросу об адекватности трехмерного газодинамического моделирования ГТД в современных программных комплексах / *Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.* — 2008. — № 1. — С. 11–20.
- Семиненко, А. С.** Повышение эффективности систем вентиляции при пневмотранспортном складировании порошкообразных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / *Артем Сергеевич Семиненко.* — Белгород, 2018. — 191 с. ■

Получено 28.10.18

© А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, В. А. Ткаченко, 2019 г.