

УДК 533.6:628.511

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены теоретические предпосылки для снижения энергоемкости аспирационных систем. Разработана классификация способов и средств минимизации расходов воздуха, поступающего в аспирационные укрытия через неплотности, и снижения объемов воздуха, поступающего в укрытие по загрузочному желобу.

Ключевые слова: аспирационное укрытие, перегрузка сыпучих материалов, снижение энергоемкости аспирационных систем.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного общества в направлении безграничного обогащения, особенно в так называемых развивающихся странах мира, сопровождается интенсивным ростом потребления невозобновляемых энергоресурсов и обработки минерального сырья, а также значительными темпами загрязнения окружающей среды. Еще в середине прошлого века в Бюраканской обсерватории на международном конгрессе по связям с внеземными цивилизациями возникла необходимость рассмотреть смежные вопросы существования цивилизаций и причины их гибели. Ранжируя эти причины, научное сообщество поставило загрязнение окружающей среды на второе место после термоядерной катастрофы. Сегодня мы являемся свидетелями критического состояния самосохранения природы и ее венца — человека.

Вот уже 100 лет системы аспирации, как наиболее эффективные средства локализации пылевых выделений и очистки воздуха от пыли, служат надежным техническим приемом защиты атмосферы производственных помещений и промышленных площадок предприятий от пылевых загрязнений при механической переработке и транспортировании сыпучих материалов. На многих предприятиях по производству строительных материалов (производство цемента, извести, стеновых материалов) и огнеупоров в черной и цветной металлургии (дробильно-сортировочные и обогатительные фабрики железных руд, агломерационные и окомковательные фабрики, доменные цехи) суммарная мощность систем аспирации сопоставима с мощностью технологического оборудования. Тем не менее их мощность можно существенно снизить путем квалифицированного

проектирования элементов аспирационных установок, и прежде всего грамотного выбора оптимальной производительности местных отсосов, рациональных конструкций и схем их размещения.

Основными потребителями электроэнергии в системах аспирации являются тягодутьевые средства (вентиляторы, дымососы). Требуемую мощность N , кВт, потребляемую электродвигателями этих тягодутьевых средств, определяют по формуле

$$N = \frac{Q_a \Delta P_c}{1000 \eta_v \eta_n}, \quad (1)$$

где Q_a — общий расход воздуха, удаляемого вентилятором (производительность аспирационной установки), $\text{м}^3/\text{с}$; ΔP_c — сопротивление аспирационной сети главной магистрали (воздуховодов, пылеуловителей, выбросной трубы), Па; η_v, η_n — КПД вентилятора и передачи. Формула (1) наглядно демонстрирует направления энергосбережения аспирации: минимизация объемов аспирации, минимизация потерь давления в элементах аспирационной сети, повышение КПД вентилятора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ ОБЪЕМОВ АСПИРАЦИИ

Рассмотрим приемы (способы и средства) уменьшения требуемых объемов аспирации для случая классической перегрузки сыпучего материала с верхнего конвейера на нижний. Составим воздушный баланс для двух аспирируемых укрытий: укрытия приводного барабана верхнего конвейера и укрытия места загрузки нижнего укрытия. Будем полагать, что по призматическому желобу перегружается нагретый сыпучий материал (рис. 1).

В результате динамического взаимодействия (за счет аэродинамических сил падающих частиц и воздуха) в желобе возникает направленное движение эжектируемого воздуха. Предположим, что движение происходит по схеме прямотока (сверху вниз) и его массовый расход обозначим G_g , кг/с. В результате межкомпонентного теплообмена в желобе возникает направленный вверх тепловой напор p_t , Па, который препятствует эжекции воздуха (за счет уменьшения эжекционного давления p_e , Па, направленного вниз). Из аспирируемых укрытий при работе вентилятора осуществляется удаление воздуха в количестве G_{a1} , кг/с, и G_{a2} , кг/с, и в них поддерживаются нормируемые разрежения p_1 , Па, и p_2 , Па, за счет которых происходит подсос воздуха через неплотности укрытий в количестве G_{n1} , кг/с, для верхнего укрытия и G_{n2} , кг/с, для нижнего. При такой схеме движения воздуха на основании закона сохранения массы (предполагаем, что межкомпонентный массообмен отсутствует) можно записать

$$G_{a1} = G_{n1} - G_g; G_{a2} = G_{n2} + G_g, \quad (2)$$

откуда получается очевидное равенство

$$G_{a1} + G_{a2} = G_{n1} + G_{n2}. \quad (3)$$

Суммарный расход удаляемого из укрытий воздуха равен сумме расходов воздуха, поступающего через неплотности укрытий. Этот факт повышает значимость влияния герметизации аспириционных укрытий (кожухов оборудования) на минимизацию объемов аспирации. Кроме того, в силу первого равенства (2) может оказаться, что $G_{a1} < 0$. Это может произойти при $G_g > G_{n1}$, т. е. когда расход эжектируемого воздуха будет выше расхода воздуха, поступающего в укрытие через неплотности при нормируемом разрежении в укрытии p_1 . При таком результате устройство верхнего отсоса не предусматривается, а разрежение в этом укрытии будет выше нормируемого за счет перетока воздуха по желобу в нижнее укрытие. Таким образом, путем анализа решений системы уравнений воздушного баланса не только минимизируются объемы аспирации, но и выбираются расчетным путем рациональные схемы размещения местных отсосов.

Для замыкания системы уравнений (2) запишем используемое в расчетной практике соотношение для расхода воздуха, поступающего в укрытия через неплотности:

$$G_n = S_n \sqrt{\frac{2p_n \rho_0}{\zeta_n}}, \quad (4)$$

где S_n — площадь неплотностей укрытия, м²; p_n — разрежение, поддерживаемое в укрытии, Па; ζ_n — коэффициент местных сопротивлений (к.м.с.) неплотностей; ρ_0 — плотность окружающей среды, кг/м³.

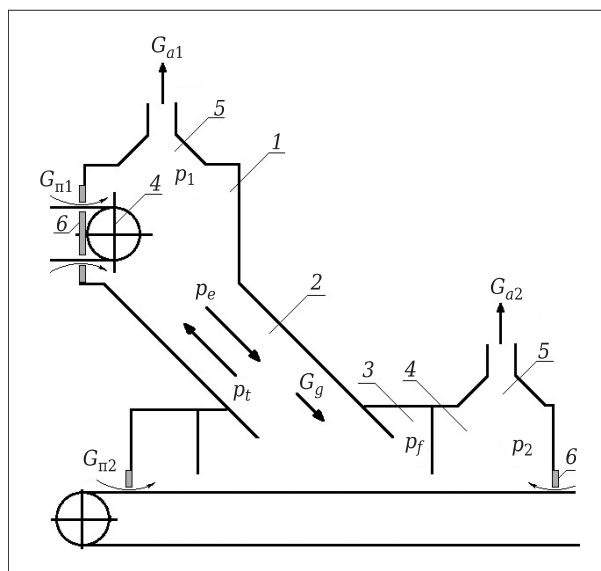


Рис. 1. Схема воздушного баланса аспириционных укрытий перегрузки сыпучего материала: 1 — укрытие приводного барабана верхнего конвейера; 2 — перегрузочный желоб; 3 — внутренняя камера (формкамера) нижнего укрытия; 4 — укрытие места загрузки нижнего конвейера; 5 — аспириционные патрубки; 6 — уплотнения укрытий; p_f — давление в формкамере

Величины S_n и p_n в практике проектирования нормируются в зависимости от вида технологического оборудования, конструкции укрытия, вида перерабатываемого (транспортируемого) материала.

Механизм перетекания воздуха по желобу намного сложнее движения воздушного потока через простейшие отверстия неплотностей. В практике проектирования получило распространение использование коэффициента эжекции $\phi = u_2 / v_k$, где u_2 — средняя скорость эжектируемого воздуха в желобе, м/с; v_k — скорость падения частиц при выходе из желоба, м/с. Массовый расход G_g , кг/с, при этом будет иметь вид

$$G_g = \phi v_k S_g \rho, \quad (5)$$

где S_g — площадь поперечного сечения желоба, м²; ρ — плотность воздуха в желобе, кг/м³.

Для случая равноускоренного потока частиц в желобе коэффициент эжекции вычисляют из критериального уравнения

$$\phi|\phi| = Eu + \frac{Bu}{3} [1 - \phi]^3 - |n - \phi|^3, \quad (6)$$

где Eu — число Эйлера; Bu — число Бутакова — Нейкова, характеризующее величину эжекционного давления равноускоренным потоком частиц со средним эквивалентным диаметром d_e , м; n — отношение скоростей частиц в начале и конце желоба;

$$Bu = \frac{1.5 \psi G_m v_k}{d_e \rho_m S_g g \sum \zeta} \quad (7)$$

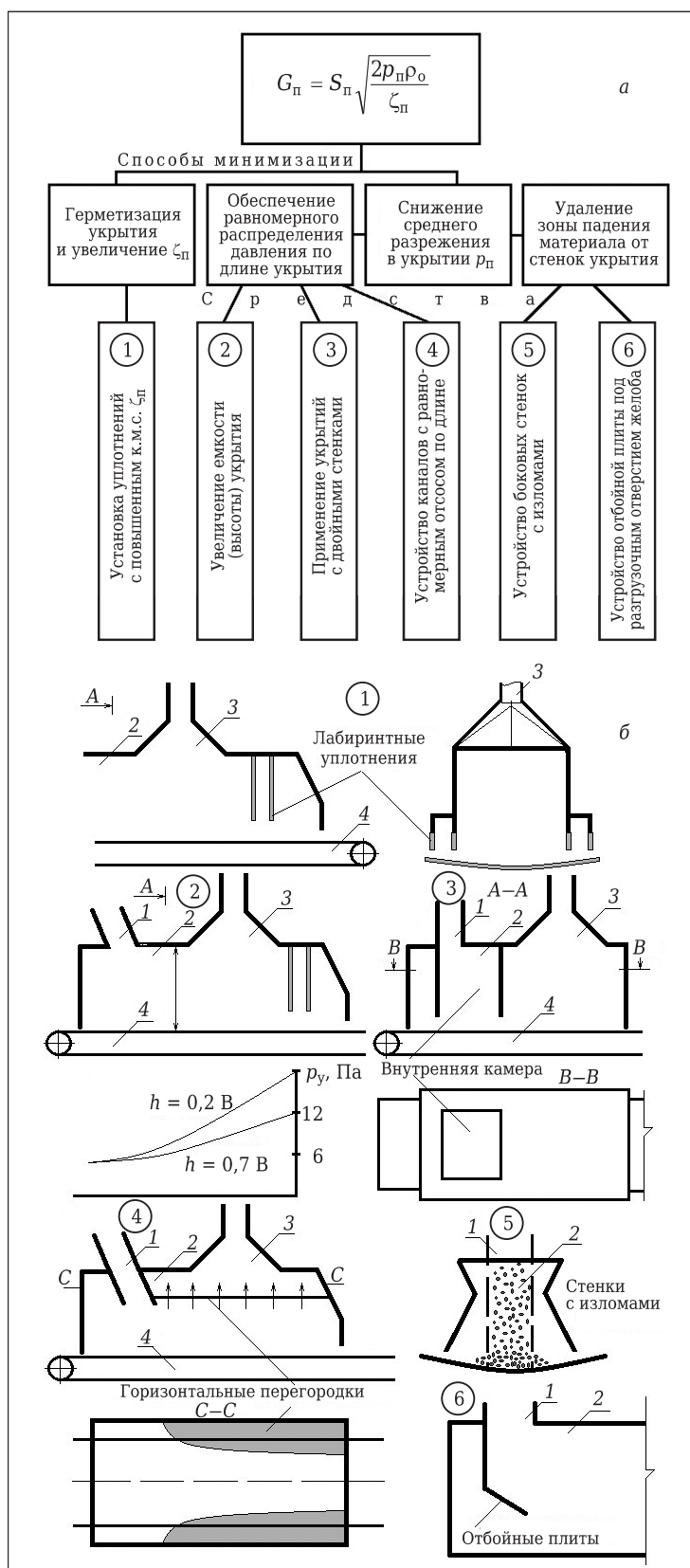


Рис. 2. Классификация способов и средств минимизации расходов воздуха G_p , поступающего в нижнее укрытие через неплотности (а), и схемы технических средств ①–⑥ снижения G_p (б) для нижнего укрытия (места загрузки нижнего конвейера): 1 — перегрузочные желоба; 2 — аспирационные укрытия; 3 — аспирационные патрубки; 4 — ленточные конвейеры

ψ — коэффициент лобового сопротивления частиц (следует иметь в виду, что $\psi = f(G_m, v_k, d_e)$); G_m — расход сыпучего материала, кг/с; ρ_m — плотность частиц сыпучего материала, кг/м³; g — ускорение силы тяжести, м/с²; $\sum \zeta$ — сумма к.м.с. желоба; Eu — число Эйлера, характеризующее влияние на расход эжектируемого воздуха разрежений в укрытиях и величину теплового напора:

$$Eu = \frac{p_{n2} - p_{n1} - p_t}{\sum \zeta \frac{v_k^2}{2} \rho} \quad (8)$$

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА МИНИМИЗАЦИИ ОБЪЕМОВ АСПИРАЦИИ

Для наглядности классификационных схем минимизации объемов аспирации рассмотрим отдельно способы и средства минимизации расхода воздуха G_p , поступающего через неплотности [1 – 10] (рис. 2), и расхода воздуха G_g , поступающего в укрытие по желобу (рис. 3).

Герметизация укрытий, как правило, осуществляется с помощью гибких полос из бывшей в употреблении конвейерной ленты путем максимально возможного перекрытия отверстий (главным образом в местах примыкания движущихся лент конвейера к неподвижным стенкам укрытия). Причем важно не только максимальное перекрытие этих неплотностей, но и устройство уплотнений с повышенным аэродинамическим сопротивлением, например с помощью двойных фартуков, экранов или лабиринтных уплотнений (см. рис. 2, б, схема 1).

Вторым важным направлением снижения G_p является уменьшение среднего разрежения в укрытии путем обеспечения равномерного распределения разрежения p_y по длине укрытия. Это можно обеспечить, во-первых, с помощью увеличения емкости укрытия (высоты h ; уже при высоте $h = 0,7B$, где B — ширина ленты конвейера, разрежение заметно выравнивается, см. графики на рис. 2, б, схема 2); во-вторых, устройством укрытия с внутренней камерой (рис. 2, б, схема 3), вертикальные стенки которой увеличивают аэродинамическое сопротивление движению эжектируемого воздуха, что не только выравнивает разрежение по длине наружной камеры, но и снижает расход G_g

(рис. 2, б, схема 3); в-третьих, размещением в полости укрытия двух горизонтальных профилированных перегородок, образующих переменную щель для обеспечения равномерного отсоса эжектируемого воздуха из нижней полости укрытия (рис. 2, б, схема 4).

Выравнивая разрежение по длине укрытия, можно снизить нормируемую (среднюю по длине) величину разрежения p_n . Так, для обычного укрытия (с одинарными стенками) $p_n = 10 \div 12$ Па, а для укрытия с двумя камерами $p_n = 6$ Па, т. е. в 1,5 раза меньше. Важным фактором снижения нормируемого разрежения является увеличение удаленности возможных отверстий (в местах сопряжения стенок укрытия и движущейся ленты конвейера) от зоны падения перегружаемого материала, что дает возможность также исключить вынос пылевых частиц воздухом за счет компрессии в момент укладки падающих частиц материала на ленту конвейера. Удаление зоны падения частиц от возможного сосредоточения неплотностей можно осуществить устройством продольных стенок с изломом или предусмотрев отбойные плиты или карманы в башмаке желоба (см. рис. 2, б, схемы 5 и 6). В последнем случае предотвращается абразивный износ конвейерной ленты.

Минимизация объемов эжектируемого воздуха G_g осуществляется в следующих направлениях (см. рис. 3, а):

- снижение скорости падения частиц сыпучего материала, что приводит к уменьшению сил межкомпонентного взаимодействия;
- увеличение аэродинамического сопротивления по пути движения эжектируемого воздуха к аспирационному патрубку, что снижает величину чисел Eu и Bu и в конечном итоге уменьшает коэффициент эжекции;
- организация замкнутой циркуляции (рецикла) воздуха путем устройства байпасных камер, что снижает объем эжектируемого воздуха, поступающего в аспирационный патрубок.

Реализация этих способов осуществляется следующими техническими средствами.

1. Снижением скорости падения частиц, которое можно осуществить: устройством наклонных желобов (см. рис. 3, б, схема 1), при этом возрастают

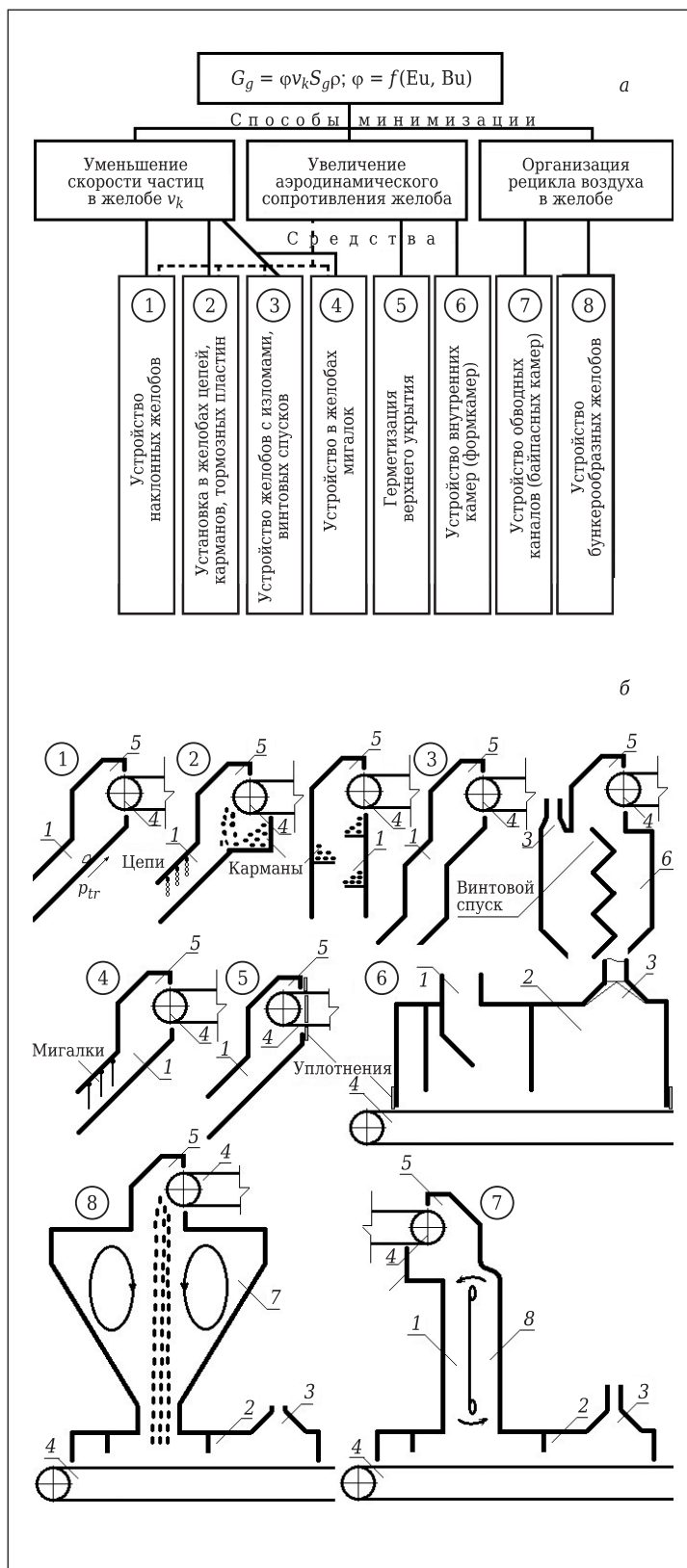


Рис. 3. Классификация способов и средств минимизации расхода воздуха G_g , поступающего в нижнее укрытие по желобу (а), и схемы технических средств ①–⑧ снижения G_g (б) для нижнего укрытия: 1 — перегрузочные желоба; 2 — аспирационные укрытия; 3 — аспирационные воронки; 4 — ленточные конвейеры; 5 — укрытие приводного барабана верхнего конвейера; 6 — бункер; 7 — бункерообразный желоб; 8 — байпасная камера

силы трения p_{tr} частиц о наклонное днище желоба; установкой (подвеской) цепных гирлянд или карманов (см. рис. 3, б, схема 2), мигалок (см. рис. 3, б, схема 4), а также устройством желоба с изломами и винтовых спусков (см. рис. 3, б, схема 3). Эти устройства не только снижают скорость падения частиц за счет интенсификации сил трения, но и увеличивают аэродинамическое сопротивление движению эжектируемого воздуха, т. е. имеют двойное назначение. Кроме того, увеличение суммы к.м.с. и, как следствие, уменьшение чисел Eu и Bu вызывают специальные устройства, герметизирующие верхнее укрытие (см. рис. 3, б, схема 5), что способствует увеличению сопротивления входу воздуха ζ_w через оставшиеся отверстия $f_{п.о}$ в силу известного соотношения

$$\zeta_w = 2A \left(\frac{S_g}{f_{п.о}} \right)^2, \quad (9)$$

а также устройство внутренних камер (формкамер) в нижнем укрытии (см. рис. 3, б, схема 6), стенки которых увеличивают аэродинамическое сопротивление выхода воздуха из желоба.

2. Рециркуляцией воздуха путем устройства байпасных камер (см. рис. 3, б, схема 7) либо орга-

низацией специальных камер для естественной рециркуляции в бункерообразных желобах (см. рис. 3, б, схема 8), что обеспечивает заметное снижение объемов эжектируемого воздуха, поступающего в аспирационный патрубок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы направления энергосбережения при эксплуатации систем аспирации. Разработана классификация способов и средств минимизации расходов воздуха, поступающего в аспирационное укрытие через неплотности и по загрузочному желобу. Описанные технические средства и способы снижения энергоемкости аспирационных систем могут быть полезны как для реконструкции существующих систем аспирации, так и для создания новых обеспыливающих систем вентиляции промышленных предприятий при переработке порошковых материалов.

* * *

Работа выполнена по гранту Президента РФ НШ-588.2012.8, РФФИ № 12-08-97500-р центр а и плана стратегического развития БГТУ им. В. Г. Шухова.

Библиографический список

1. **Аверкова, О. А.** Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2010. — № 5. — С. 31–36.
2. **Аверкова, О. А.** Numerical simulation of air currents at the inlet to slot leaks of ventilation shelters / O. A. Averkova, V. Yu. Zorya, I. N. Logachev [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 3. — P. 177–182.
3. **Логачев, К. И.** Расчеты щелевых отсосов, экранированных тонкими козырьками / К. И. Логачев, Н. М. Анжеуров // Новые огнеупоры. — 2002. — № 7. — С. 38–41.
4. **Logachev, K. I.** Flow Analysis of Slit-Type Suction Ports Shielded with Slender Visors / K. I. Logachev, N. M. Anzheurov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2003. — Vol. 44, № 3. — P. 145–148.
5. **Анжеуров, Н. М.** Комплекс компьютерных программ для расчета пылевоздушных течений в системах аспирации / Н. М. Анжеуров, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2008. — № 5. — С. 53–58.
6. **Anzheurov, N. M.** Software for computing dusty air flows in ventilation systems / N. M. Anzheurov, O. A. Averkova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2008. — Vol. 49, № 3. — P. 229–234.
7. **Аверкова, О. А.** Моделирование отрыва потока на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Новые огнеупоры. — 2012. — № 10. — С. 56–60.
8. **Аверкова, О. А.** Моделирование потенциальных течений с неизвестными границами на основе стационарных дискретных вихрей / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев,

- К. И. Логачев // Вычислительные методы и программирование. — 2011. — Т. 12, № 2. — С. 213–219.
9. **Аверкова, О. А.** Разработка метода математического моделирования отрывных течений на основе стационарных дискретных вихрей / О. А. Аверкова, И. Н. Логачев, К. И. Логачев // Научные ведомости БелГУ. Серия История. Политология. Информатика. — 2011. — Т. 96, № 1, вып. 17/1. — С. 130–136.
10. **Логачев, И. Н.** Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, В. Ю. Зоря [и др.] // Вычислительные методы и программирование. — 2010. Т. 11, № 1. — С. 43–52.
11. **Логачев, И. Н.** Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 68–77.
12. **Логачев, И. Н.** Математическое моделирование струйного течения воздуха при входе в плоский канал с козырьком и непроницаемым экраном / И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 2. — С. 160–167.
13. **Аверкова, О. А.** Компьютерное моделирование вихревых течений в аспирационном укрытии с щелевыми неплотностями / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. Логачев // Научные ведомости БелГУ. Серия История. Политология. Экономика. Информатика. — 2010. — Т. 95, № 1, вып. 13/1. — С. 93–100. ■

Получено 16.02.13

© И. Н. Логачев, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, 2013 г.