

К. Т. Н. Ю. Г. Овсянников, К. Т. Н. А. Б. Гольцов, А. С. Семенов,  
д. Т. Н. К. И. Логачёв (✉), д. Т. Н. В. А. Уваров

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

УДК 533.6:628.5

## СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ

Предлагается способ снижения пылевого выброса и энергоемкости аспирационной системы путем совершенствования организации принудительной подачи рециркуляционного воздуха в перегрузочный желоб. Часть аспирируемого воздуха подается в перегрузочный желоб, способствуя снижению объемов эжектируемого воздуха, увлекаемого потоком сыпучего материала. При помощи компьютерного моделирования исследуется влияние геометрических параметров и расхода рециркуляционной струи на объем эжектируемого воздуха.

**Ключевые слова:** обеспыливающая вентиляция, аспирируемое укрытие, рециркуляция, выбросы пыли, объемный расход, сыпучие материалы, увлечение воздуха потоком твердых частиц.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы производства и переработки сыпучих материалов в различных отраслях промышленности (строительной, горнорудной, металлургической, угольной и др.) сопровождаются интенсивным выделением пыли [1–3], основной причиной которого является эжекция — увлечение потоком сыпучего материала воздуха, что обусловило значительный научный интерес к этому явлению [4–8].

Наиболее эффективный способ борьбы с пылевыделением — применение систем комплексного обеспыливания, которые включают аспирационные системы (АС), средства борьбы с вторичным пылевыделением и общеобменную вентиляцию.

Наряду с большим пылевым выбросом в атмосферу, негативно сказывающимся на экологической обстановке, эксплуатация АС требует существенных прямых энергозатрат, которые в ряде случаев могут достигать 20 % от технологических мощностей [9, 10]. В холодный период времени эксплуатация АС обуславливает рост теплопотребления на подогрев приточного воздуха. Энергоемкость АС в значительной степени зависит от расхода аспирируемого воздуха, основными составляющими которого являются объемы эжектируемого и просасываемого через неплотности укрытия воздуха.

Одним из перспективных направлений совершенствования проточных АС (рис. 1, а), позволяющих значительно сократить выброс

запыленного воздуха в атмосферу, является рециркуляция — возврат в перегрузочный желоб части аспирируемого воздуха. Рециркуляция может быть организована по естественной и принудительной схемам.

Перепад давлений, возникающий по высоте перегрузочного желоба, позволяет осуществлять естественную рециркуляцию за счет устройства байпасных (обводных) каналов [11] либо за счет использования перфорированной загрузочной трубы, содержащейся в круглой байпасной камере [12, 14].

В отличие от естественной, принудительная рециркуляция позволяет более существенно снизить выброс из АС и довести его до величины, обусловленной неплотностями укрытий, а также влиять на процесс формирования эжектируемого потока воздуха.

Цель работы — численное обоснование предлагаемого способа подачи рециркуляционного потока, позволяющего влиять на процесс формирования объемов эжектируемого воздуха.

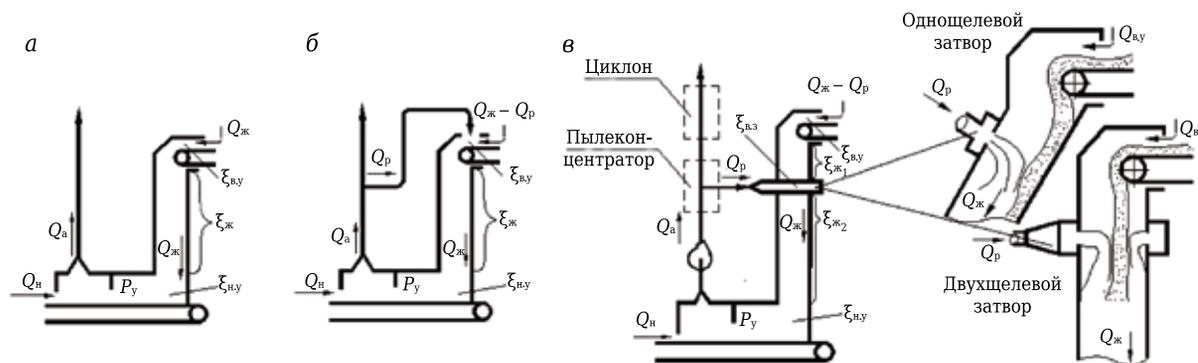
### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Анализ аэродинамики существующих систем свидетельствует о недостаточности внимания, уделяемого вопросам рациональной организации подачи рециркуляционного воздуха в перегрузочные желоба. Существующие способы, как правило, сводятся к своеобразному замещению эжектируемого потока воздуха рециркуляционным (рис. 1, б). При этом производительность системы по воздуху в лучшем случае остается неизменной.

В работе [15] установлено, что снижению объемов аспирации  $Q_{ж}$  рециркуляционной системы способствует рост гидравлического со-



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



**Рис. 1.** Принципиальные схемы аспирационных систем: а — проточной, б и в — с принудительной рециркуляцией;  $\xi_{в,з}$ ,  $\xi_{ж,1}$ ,  $\xi_{ж,2}$ ,  $\xi_{н,у}$ ,  $\xi_{в,у}$  — коэффициенты местных сопротивлений воздушного затвора, желоба до и после воздушного затвора, нижнего и верхнего укрытия соответственно;  $Q_a$ ,  $Q_ж$ ,  $Q_p$  и  $Q_n$  — объемы аспирируемого, эжектируемого, рециркуляционного и просасываемого через неплотности укрытия воздуха соответственно;  $P_y$  — разрежение в укрытии

противления тракта верхнее укрытие – желоб – нижнее укрытие, для обеспечения которого предлагается принципиально новый способ подачи рециркуляционного потока в перегрузочный желоб и устройства его реализации — однощелевой и двухщелевой воздушные затворы (рис. 1, в).

Рециркуляционный воздух подается в желоб в виде плоских струй, направленных под углом  $90^\circ$  к потоку, эжектируемому перегружаемым материалом. Таким образом в сечении желоба создается дополнительное аэродинамическое сопротивление — воздушный затвор, свободно пропускающий перегружаемый материал и препятствующий движению эжектируемого воздуха.

Для повышения эффективности работы рециркуляционного распределителя нами предлагается осуществлять подачу рециркуляционного потока под углом  $\alpha$  (рис. 2) к направлению эжектируемого потока воздуха. В эксперименте рассматривается двухщелевой затвор для вертикального желоба. При этом основная задача

— исследование потенциальной эффективности данного способа подачи — была решена нами в ходе численного эксперимента в программном комплексе COSMOSFloWorks. Для моделирования использовали уравнения неразрывности, Навье – Стокса и энергии стационарного пространственного течения в соответствии с  $k-\epsilon$  моделью турбулентности.

В процессе эксперимента по исследованию рециркуляции решается внутренняя стационарная задача движения воздуха в полости вертикального желоба (высота 1000 мм, сечение  $300 \times 300$  мм) от верхнего до нижнего укрытия (см. рис. 2). Для решения задачи были приняты начальные (физические параметры среды, характерные для нормальных условий) и граничные условия исследуемой модели (см. рис. 2).

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

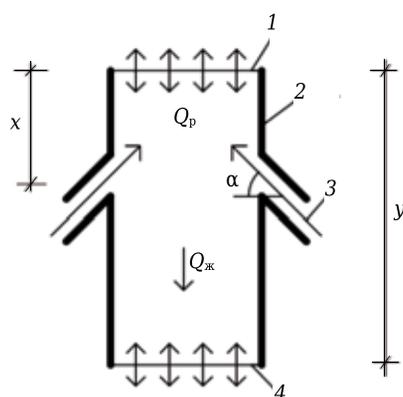
В центральном композиционном плане, используемом в методике планирования эксперимента, приняты следующие факторы: угол наклона струи рециркуляционного воздуха  $\alpha$ , расход рециркуляционного воздуха  $Q_p$  и положение затвора по высоте  $x/y$ . При этом задача решалась при разности давлений  $\Delta P$  между поверхностями 1 (15 Па) и 4 (30 Па).

При отсутствии подачи воздуха (рис. 3) через рециркуляционный двухщелевой затвор получены следующие расходы эжекционного воздуха:

$\Delta P$ .....	30	25	20	15	10	5
$Q_ж$ , м <sup>3</sup> /с.....	0,58	0,52	0,47	0,41	0,33	0,27

В процессе эксперимента фиксировали выходные величины (отклики) расхода воздуха в желобе аспирационного укрытия  $Q_ж$ .

В таблице приведены основные результаты проведенных экспериментов. На рис. 4, 5 представлены функции отклика  $Q_ж = f(\alpha; Q_p; x/y)$ . Данные функции отклика адекватно отражают модель при следующих диапазонах варь-



**Рис. 2.** Граничные условия численного эксперимента: 1 — поверхность входа эжектируемого потока (давление 101325 Па); 2 — стенка аспирационного укрытия; 3 — вход рециркуляционного воздуха в аспирационное укрытие; 4 — поверхность выхода эжектируемого потока (давление 101310 и 101295 Па)

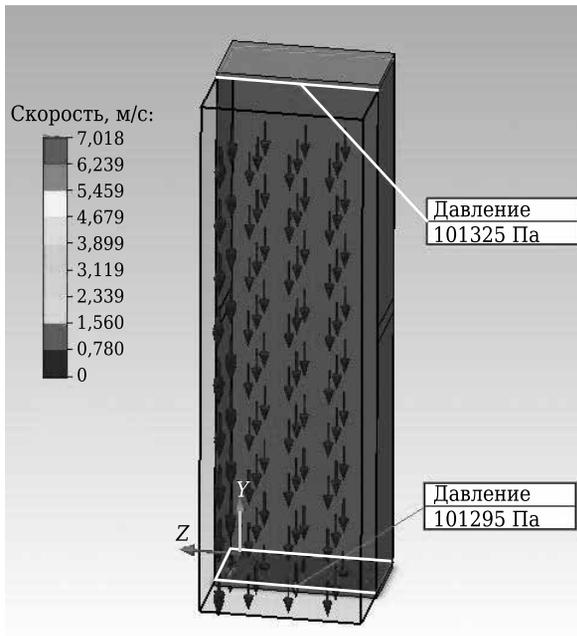


Рис. 3. Поле скоростей в загрузочном желобе при отсутствии встречной струи

руемых факторов:  $Q_p = 0,1 \div 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $\alpha = 30 \div 60^\circ$ ;  $x/y = 0,3 \div 0,7$ . Поле скоростей воздуха показано на рис. 6.

На основании полученных результатов численного эксперимента установлено:

Результаты проведенных экспериментов

Эксперимент	Факторы			Отклики	
	$\alpha$	$Q_p$	$x/y$	$Q_{ж}$ при $\Delta P = 15 \text{ Па}$	$Q_{ж}$ при $\Delta P = 30 \text{ Па}$
1	60	0,2	0,7	-0,08	0,04
2	45	0,15	0,5	0,06	0,19
3	45	0,15	0,836	0,05	0,19
4	30	0,2	0,7	0,10	0,21
5	60	0,2	0,3	0,02	0,08
6	19,77	0,15	0,5	0,14	0,33
7	60	0,1	0,3	0,11	0,35
8	60	0,1	0,7	0,13	0,29
9	45	0,15	0,164	-0,03	0,30
10	45	0,066	0,5	0,26	0,47
11	45	0,234	0,5	-0,09	0,04
12	45	0,15	0,5	0,06	0,19
13	30	0,2	0,3	0,11	0,25
14	30	0,1	0,7	0,21	0,40
15	70,23	0,15	0,5	0,00	0,00
16	30	0,1	0,3	0,24	0,43

- повышение  $Q_p$  и увеличение угла подачи  $\alpha$  рециркуляционного потока приводят к снижению объемов аспирируемого воздуха;
- наиболее интенсивное снижение  $Q_{ж}$  наблюдается при увеличении  $q = Q_p/Q_{ж}$  на величину более 0,5;
- при  $q = (Q_p/Q_{ж}) > 1$  наблюдается выбивание воздуха через верхнюю плоскость, что недопустимо, так как нарушает локализирующее действие аспирационного укрытия;

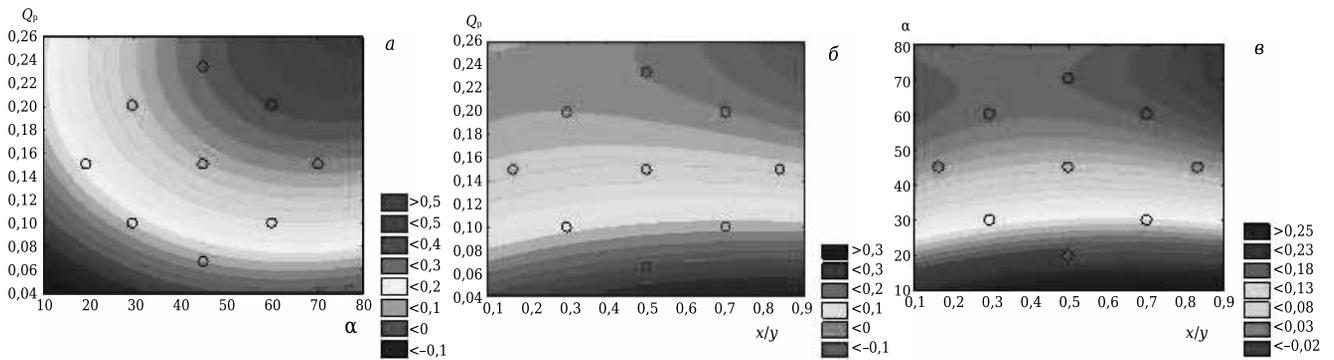


Рис. 4. Поверхность отклика функциональной зависимости: а —  $Q_{ж} = f(Q_p; \alpha)$  при  $\Delta P = 15$ ,  $x/y = 0,5$ ; б —  $Q_{ж} = f(Q_p; x/y)$  при  $\Delta P = 15$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ; в —  $Q_{ж} = f(\alpha; x/y)$  при  $\Delta P = 15$ ,  $Q_p = 0,15$

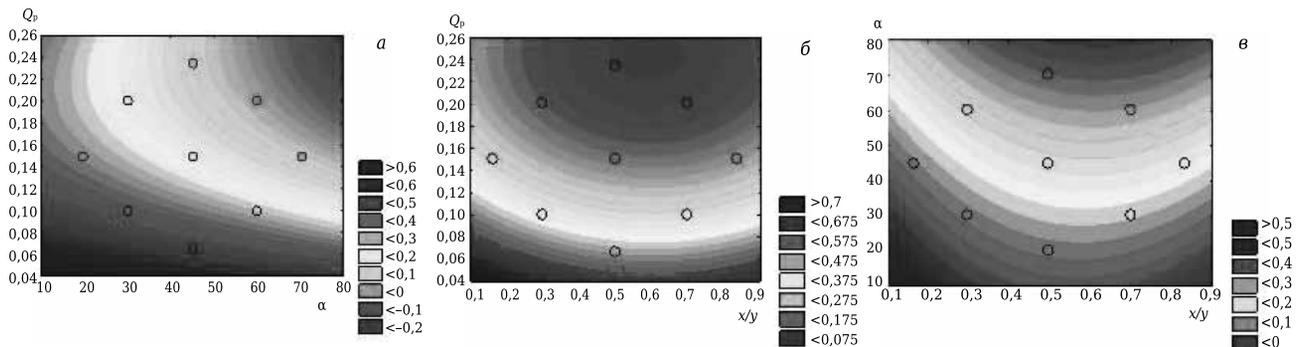


Рис. 5. Поверхность отклика функциональной зависимости: а —  $Q_{ж} = f(Q_p; \alpha)$  при  $\Delta P = 30$ ,  $x/y = 0,5$ ; б —  $Q_{ж} = f(Q_p; x/y)$  при  $\Delta P = 30$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ; в —  $Q_{ж} = f(\alpha; x/y)$  при  $\Delta P = 30$ ,  $Q_p = 0,15$

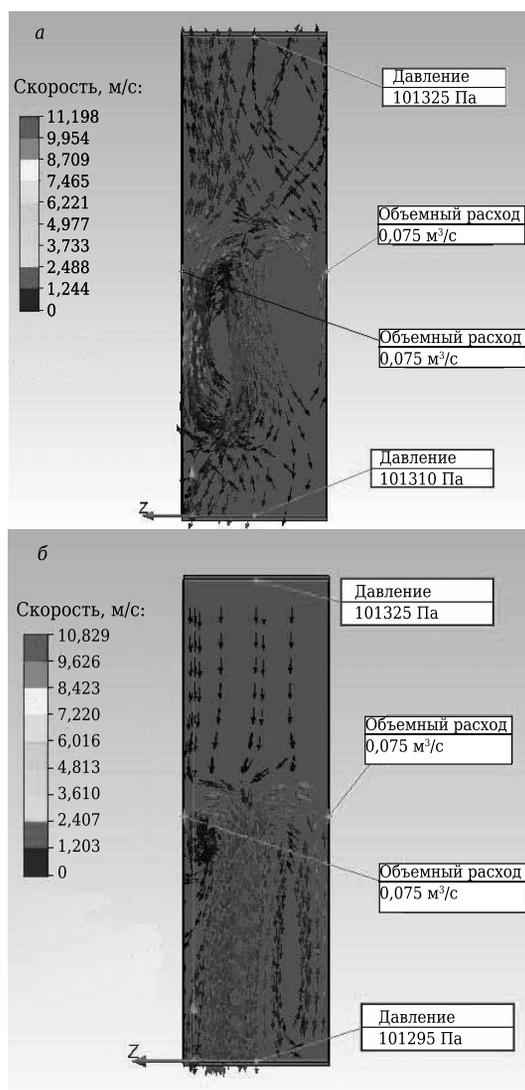


Рис. 6. Поле скоростей в загрузочном желобе при эксперименте № 2 (см. таблицу) при 15 (а) и 30 (б) Па

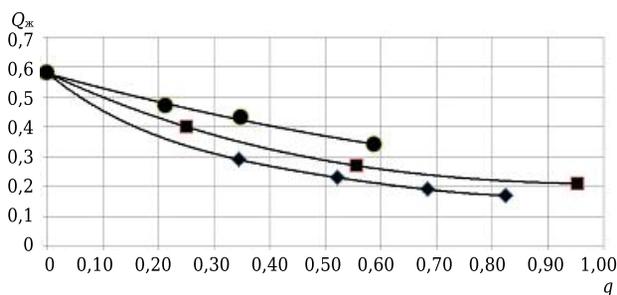


Рис. 7. Зависимость  $Q_{ж}$  от  $q = Q_p/Q_{ж}$  при  $\Delta P = 30$  Па,  $x/y = 0,5$  и  $\alpha$ , град:  $\blacklozenge$  — 60;  $\blacksquare$  — 30;  $\bullet$  — 0

– положение рециркуляционного затвора ( $x/y$ ) практически не оказывает влияния на повышение аэродинамического сопротивления, но при положении, более близком к верхней плоскости  $x/y < 0,5$ , чаще наблюдается выбивание воздуха через верхнюю плоскость;

– подача рециркуляционного потока под углом позволяет более существенно снизить объемы эжекции.

Анализ графиков, представленных на рис. 7, показывает:

– увеличение угла  $\alpha$  подачи рециркуляционного потока приводит к более интенсивному снижению расхода эжектируемого воздуха;

– при угле подачи рециркуляционного потока  $\alpha = 0$  и  $q = 0,58$  расход эжектируемого воздуха снизится на 43 % в сравнении с этим показателем проточной схемы перегрузки;

– увеличение угла подачи до  $60^\circ$  при  $q = 0,8$  расход эжектируемого воздуха снизится на 63 % в сравнении с показателем при проточной схеме перегрузки и на 47 % при рециркуляции под углом  $\alpha = 0$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый способ подачи рециркуляционного потока позволяет за счет снижения объемов эжектируемого воздуха снизить расход аспирируемого воздуха, а значит, и потребляемую мощность вентилятора системы и, следовательно, расход электроэнергии.

Наряду с чисто экономической целесообразностью использование рециркуляции позволяет также снизить экологический ущерб окружающей среде, в связи с чем очевидна целесообразность применения таких систем. Рециркуляционную струю в загрузочный желоб следует подавать под углом к потоку сыпучего материала, не превышающим  $60^\circ$ . В этом случае расход эжектируемого воздуха снижается более чем на 70 % при отношении расходов рециркулируемого и эжектируемого воздуха  $>0,8$ . Увеличение этого отношения на величину  $>1$  недопустимо в связи с нарушением локализирующего действия укрытия. Подачу рециркулируемого воздуха следует осуществлять в сечении желоба, удаленном от входа в укрытие на величину, не превышающую  $2/3$  его длины. Увеличение угла подачи рециркуляционной струи в загрузочный желоб не приведет к более существенному снижению расхода эжектируемого воздуха, но усилит вероятность попадания перегружаемого материала в щели воздушного затвора.

\* \* \*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-08-00074а).

### Библиографический список

1. **Hartman, H. L.** Mine Ventilation and Air Conditioning / H. L. Hartman, J. M. Mutmansky, R. V. Ramani, Y. J. Wang. — Wiley-Interscience, 1997. — 752 p.
2. **Logachev, I. N.** Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev. — Boca Raton : CRC Press, 2014. — 417 p.

3. **Huque S. T.** The transfer chute design manual: for conveyor belt systems / S. T. Huque, P. Donecker, J. J. Rozentals, C. W. Benjamin. — Conveyor transfer design pty. Ltd, 2010. — 272 p.
4. **Mallick, S.** Evaluation of scaleup procedures using «system» approach for pneumatic conveying of powders / S. Mallick, P. W. Wypych // Particulate Sci. Technol. — 2010. — Vol. 28, № 1. — P. 41–50.
5. **Hastie, D.** Researching conveyor belt trajectories / D. Hastie, P. Wypych // Engineers Australia. — 2009. — Vol. 81, № 8. — P. 50.
6. **Li, X.** Developments in studies of air entrained by falling bulk materials / X. Li, Q. Wang, Qi Liu, Ya. Hu // Powder Technology. — 2016. — Vol. 291. — P. 159–169.
7. **Fang, Ch.** Experimental investigation on particle entrainment behaviors near a nozzle in gas-particle coaxial jets / Ch. Fang, J. Xu, Hui Zhao, W. Li, H. Liu // Powder Technology. — 2015. — Vol. 286. — P. 55–63.
8. **Koichiro, O.** Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment / O. Koichiro, F. Katsuya, T. Yuji // Powder Technology. — 2001. — Vol. 115. — P. 90–95.
9. **Гольцов, А. Б.** Расчет объемов аспирации при переработке руды / А. Б. Гольцов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2005. — № 12. — С. 19–21.
10. **Гольцов, А. Б.** Аспирационное укрытие мест загрузки ленточных конвейеров в производстве силикатного кирпича : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 : защищена 25.12.13 / Гольцов Александр Борисович. — Белгород, 2013. — 178 с.
11. **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.
12. **Аверкова, О. А.** Имитационное моделирование эжекции воздуха в круглой трубе с байпасной камерой / О. А. Аверкова, И. В. Крюков, Е. И. Толмачева // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2015. — № 2. — С. 207–211.
13. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 1. Вывод гидродинамических уравнений эжекции воздуха потоком сыпучего материала в перфорированном желобе с байпасной камерой / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, И. В. Крюков // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 51–56.  
**Logachev, I. N.** Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 1. Derivation of Hydrodynamic Equations of Air Ejection by a Stream of Free-Flowing Material in a Perforated Trough with Bypass Chamber / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova, I. V. Kryukov // Refractories and Industrial Ceramics — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 70–76.
14. **Логачёв, И. Н.** Методы снижения энергоёмкости систем аспирации. Часть 2. Определение эффективности использования рециркуляционных течений / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2014. — № 4. — С. 60–64.  
**Logachev, I. N.** Methods of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems. Part 2. Determining the Efficiency of Recirculating Flows / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 2, — P. 164–168.
15. **Овсянников, Ю. Г.** Аспирационные системы с принудительной рециркуляцией : монография / Ю. Г. Овсянников, А. И. Алифанова. — Белгород : изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013. — 137 с. ■

Получено 25.02.16

© Ю. Г. Овсянников, А. Б. Гольцов, А. С. Семенов, К. И. Логачёв, В. А. Уваров, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**НАНО 2016 — VI Всероссийская конференция по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи**

Конференция состоится 22–25 ноября 2016 г. в Москве, в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН.

**Направления работы конференции:**

- Секция 1 – Фундаментальные основы синтеза нанопорошков
- Секция 2 – Наноструктурные пленки и покрытия в конструкционных и функциональных материалах
- Секция 3 – Объемные наноматериалы
- Секция 4 – Нанокompозиты
- Секция 5 – Инновационные применения нанотехнологии (энергетика, машиностроение, медицина и др.) и развитие методов аттестации наноматериалов

Сборник докладов конференции НАНО 2016 будет размещен в наукометрической базе РИНЦ.

Финансовая и информационная поддержка:  
- Российская академия наук - Российский фонд фундаментальных исследований - ФАНО России - Министерство образования и науки РФ -

**Контакты:**

119334, Москва, Ленинский пр., 49  
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН  
Тел.: (499) 135-7743, (499) 135-4425  
Факс: (499) 135-8680  
E-mail: nano@imetran.ru  
Сайт: www.nano.imetran.ru