

Д. т. н. **И. Н. Логачёв**, д. т. н. **К. И. Логачёв** (✉), к. т. н. **О. А. Аверкова**

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

УДК 533.6:628.5

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ. Часть 5. Расчет объемов аспирации при перегрузках порошкообразных аутогезионных материалов*

Разрабатывается метод расчета объемов аспирации при перегрузках порошкообразных материалов с повышенными аутогезионными свойствами. Рассматриваются свободно падающая струя конгломератов и их поток в непроницаемом желобе. Полученные результаты полезны при проектировании эффективных аспирационных систем сниженной энергоемкости.

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

Увеличенный расход воздуха, отсасываемого из аспирационных укрытий, улучшает санитарно-гигиенические условия труда в производственных помещениях, но приводит к перерасходу электроэнергии и значительным потерям дорогостоящих порошков за счет повышенного уноса пылевидных фракций аспирируемым воздухом. Поэтому в практике в качестве необходимого объема удаляемого воздуха принимается минимальный объем аспирации [1–11], при котором исключается поступление запыленного воздуха в помещение. Устанавливаемое при этом в укрытии разрежение является оптимальным. Величина этого разрежения определяется, как правило, в результате обобщения натурных испытаний и зависит как от конструктивных параметров укрытия, так и от вида перерабатываемого материала. В части 5 настоящей статьи рассматриваются результаты разработки метода расчета оптимальных объемов аспирации в условиях перегрузки слипающихся порошков.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Общая производительность аспирационной системы Q_a при отсутствии тепломассообмена определяется расходом воздуха, поступающего через неплотности всех аэродинамически связанных укрытий:

* Окончание. Части статьи 1–4 опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 2, 4, 6 и 8 за 2014 г. В данной части статьи продолжается нумерация рисунков и формул с учетом представленных в частях 1–4.

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

$$Q_a = \sum_{i=1}^N Q_{ni},$$

где Q_{ni} — расход воздуха, поступающего через неплотности и рабочие проемы аэродинамически связанного укрытия, м³/с,

$$Q_{ni} = S_i \sqrt{\frac{2P_i}{\zeta_i \rho}}, \quad (44)$$

где S_i — площадь неплотностей i -го укрытия, м²; P_i — разрежение в i -м укрытии, Па; ζ_i — коэффициент местного сопротивления неплотностей (чаще всего принимается равным $\zeta_i = 2,4$); ρ — плотность воздуха в помещении, кг/м³; N — общее число аэродинамически связанных между собой укрытий, обслуживаемых аспирационной установкой.

Величина разрежения в аспирируемом укрытии P_i принимается равной величине оптимального разрежения P_{oi} . Однако это допустимо для укрытий, которые подключены непосредственно к аспирационной системе. Для неаспирируемых укрытий $P_i \neq P_{oi}$, поскольку оно определяется расходом воздуха, перетекаемого по каналам, аэродинамически связывающим это укрытие с аспирируемым укрытием. Так, для классической перегрузки ненагретого материала с конвейера на конвейер аспирируемым является нижнее укрытие (укрытие места загрузки принимающего конвейера), верхнее укрытие (укрытие приводного барабана подающего конвейера) не подключается к аспирационной системе. Разрежение в нем поддерживается за счет перетекания воздуха по желобу. В практике проектирования поэтому объем аспирации Q_a определяется по формуле воздушного баланса

$$Q_a = Q_{ch} + Q_n, \quad (45)$$

где Q_{ch} — расход воздуха, поступающего в аспирируемое укрытие по желобу под действием P_i и за счет эжектирующих свойств потока перегружаемо-

го материала, m^3/c ; Q_n — расход воздуха, поступающего в аспирируемое укрытие через неплотности (определяется по формуле (44)), m^3/c .

Эжектирующие свойства потока твердых частиц зависят от многих факторов, главные из них расход материала, крупность частиц и скорость их падения. Поток порошкового материала характеризуется движением конгломератов, размер которых в процессе их падения изменяется. Этим он отличается от потоков сыпучих минералов, размер и масса которых в процессе их падения не изменяются. Аэродинамический процесс эжектирования воздуха такими потоками в России хорошо изучен [12–14]. В основу этих исследований положены уравнения динамики двухкомпонентного потока частицы – воздух.

Конгломераты, образующиеся при сбрасывании порошков с ленточных питателей или конвейеров за счет аутогезии, имеют малую прочность, и поэтому масса и размер их изменяются в результате эрозии. Первоначальные размеры конгломератов определяются условиями деформирования слоя порошка при сбрасывании с барабана конвейера. При подходе слоя порошка к приводному барабану верхнего конвейера в результате перехода от желобчатой формы слоя к плоской образуются продольные трещины, а при сбрасывании — поперечные. На основании условия прочности получена следующая формула для начального размера d_0 , м, конгломерата [15]:

$$d_0 = 0,027 \sqrt{h},$$

где h — глубина слоя порошка на ленте, м.

Полагаем, что масса падающего конгломерата вследствие эрозии изменяется пропорционально его поверхности:

$$\frac{dm}{dt} = -\omega F,$$

где m — масса конгломерата, кг; $m = Q_k \cdot \rho_n$; Q_k — объем конгломерата, m^3 ; ρ_n — плотность порошка, kg/m^3 ; F — поверхность конгломерата, m^2 ; ω — интенсивность эрозии конгломерата, $\omega = \alpha (V - U)^2$, $kg/(c \cdot m^2)$; V — скорость падения конгломератов, m/c ; U — скорость воздушного потока, m/c ; α — коэффициент эрозии, $kg \cdot c/m^4$.

Рассмотрены два случая: свободный поток конгломератов и поток конгломератов в закрытом желобе (канале).

СВОБОДНЫЙ ПОТОК КОНГЛОМЕРАТОВ

Для определения эжектирующей способности рассматриваемого потока частиц запишем уравнение динамики свободно падающего конгломерата:

$$m \frac{dV}{dt} = mg - R$$

и уравнение изменения количества движения для воздуха в струе конгломератов в проекции на вертикальную ось Ox (направленную сверху вниз по оси струи):

$$d(\rho US \cdot U) = n_k \cdot S dx \cdot R + P_w \cdot S dx, \quad (46)$$

где ρ — плотность воздуха, kg/m^3 ; S — площадь поперечного сечения струи конгломератов, m^2 ; n_k — счетная концентрация конгломератов, $1/m^3$; R — аэродинамическая сила конгломерата, Н; P_w — масса витающих частиц порошка в единице объема, H/m^3 .

В силу эрозии конгломератов их массовый расход изменяется. Предположим, что частицы порошка, покинувшие поверхность конгломерата, будут падать со скоростью

$$V_p = U + C,$$

где C — скорость витания частиц порошка, m/c .

Таким образом, поток порошка состоит из потока конгломератов и потока витающих частиц порошка, т. е.

$$G_k + M_w = G_0,$$

где G_k , M_w — расходы, kg/c , соответственно конгломератов и витающих частиц в сечении, удаленном на расстояние x от точки сбрасывания конгломератов размером d_0 ; G_0 — начальный расход порошка, kg/c .

Аэродинамическую силу конгломерата выразим через коэффициент лобового сопротивления ψ :

$$R = \psi \cdot S_k \frac{(V - U)^2}{2} \rho,$$

где S_k — площадь миделева сечения конгломерата, m^2 .

Таким образом, изменение скорости эжектируемого воздуха в струе свободно падающих конгломератов переменной массы можно определить интегрированием следующей системы безразмерных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{U}^2}{dz} = W \left[\frac{S_k (\bar{V} - \bar{U})^2}{S_0 \bar{V}} + \frac{1 - m}{U + C} \right], \\ \frac{d\bar{V}}{dz} = \frac{1}{\bar{V}} \left[1 - \frac{S_k (\bar{V} - \bar{U})^2}{S_0 \bar{m}} \right], \\ \frac{d\bar{m}}{dz} = -M \frac{F}{F_0} \frac{(\bar{V} - \bar{U})^2}{\bar{V}}, \end{cases} \quad (47)$$

где S_0 , F_0 — площадь миделева сечения и поверхность конгломерата размером d_0 , m^2 ;

$$\bar{U} = \frac{U}{C_0}; \quad \bar{V} = \frac{V}{C_0}; \quad \bar{C} = \frac{C}{C_0}; \quad z = \frac{x}{l_\infty};$$

$$\bar{m} = \frac{m}{m_0}; \quad l_\infty = \frac{C_0^2}{g}; \quad W = \frac{G_0}{\rho C_0 S}; \quad M = \frac{\alpha C_0 l_\infty F_0}{m_0};$$

C_0 — скорость витания исходного конгломерата диаметром d_0 , m/c ; g — ускорение силы тяжести, $g = 9,81 m/c^2$; m_0 — масса исходного конгломерата, кг; S — площадь поперечного сечения струи конгломератов (принята постоянной), m^2 .

При небольшой высоте падения конгломератов (при $z = 0,5$) удалось получить приближенное решение системы (47):

$$\begin{cases} V^* = \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)(1-\varphi^2)} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{(2\varphi + \varepsilon)(1-\varphi^2)}{\varphi^3}} \right), \\ \varepsilon = M \frac{V^{*2}}{\varphi^2} \left[2 - \frac{V^*(1-\varphi)(3-\varphi)}{\varphi^2} \right] - M^* \frac{2V^{*4}}{\varphi^5}, \end{cases} \quad (48)$$

где $\varphi = U/V$ — коэффициент эжекции; V^* и M^* — параметры,

$$V^* = \frac{3}{8} \cdot \frac{\psi_0 G_0}{d_0 \rho_n S g} V, \\ M^* = \alpha \left(\frac{8}{3\psi_0} \right) \cdot \frac{\rho_n g S d_0}{\rho G_0}.$$

Проанализируем полученные результаты. Прежде всего оценим роль эрозии и влияние сопротивления воздуха. Численное интегрирование системы (47) при начальных условиях $\bar{U}(0) = 0,0001$; $\bar{V}(0) = 0,001$; $\bar{m}(0) = 1$ в области $0,2 < W < 20$ и $0 < M < 1$ (характерной для практики огнепорных заводов), показало, что роль эрозии заметно проявляется лишь при $M > 0,03$, особенно при значительных высотах падения ($z > 0,1$) и небольших величинах параметра W . Масса конгломерата при этих параметрах заметно уменьшается, частицы порошка, покинувшие его поверхность, оказывают все большее влияние на скорость эжектируемого воздуха. Сила динамического воздействия на воздух витающей частицы достигает своего максимального значения, равного силе веса частицы.

Еще меньшее значение имеет сила сопротивления воздуха. Она проявляется при $z > 0,5$. Скорость частиц (конгломератов) при учете сил сопротивления воздуха меньше скорости равноускоренного падения. Как следствие этого, уменьшаются скорость эжектируемого воздуха и коэффициент эжекции φ . При малой высоте падения $z < 0,5$, как и при малых значениях комплексного параметра V^* ($V^* < 0,5$), влияние сопротивления воздуха на величину коэффициента φ незначительно. В этом случае удовлетворительно работает упрощенная модель, описываемая уравнением (48).

ПОТОК КОНГЛОМЕРАТОВ В ЗАКРЫТОМ ЖЕЛОБЕ

Изменение количества движения для эжектируемого воздуха в канале постоянного сечения S описывается уравнением

$$d(\rho U S \cdot U) = S \cdot dp - \lambda \frac{dx}{D_g} \cdot \frac{U^2}{2} \rho \cdot S + n_k \cdot S dx \cdot R + P_w \cdot S dx,$$

отличающимся от уравнения (46) наличием градиента статического давления и потерь давления на трение. Здесь λ — коэффициент аэродинамического сопротивления стенок канала; D_g — гидравлический диаметр канала, м; p — статическое давление, Па.

Интегрируя это уравнение для равноускоренного потока конгломератов, получаем следующее расчетное соотношение для определения коэффициента эжекции $\varphi = U/V_k$:

$$\begin{cases} \varphi^2 = Eu + 4V^* \frac{1-\varphi^3 - |n-\varphi|^3}{3} + 4V^{*2} M^* A_\varphi, \\ A_\varphi = \frac{1}{\varphi + \bar{C}} \left[\frac{1-\varphi^5 - |n-\varphi|^5}{5} + \varphi \frac{1-\varphi^4 - |n-\varphi|^4}{4} - (n-\varphi)^3 \frac{1-n^3}{2} \right], \end{cases} \quad (49)$$

где

$$Eu = \frac{P_0}{\left(\sum \zeta \frac{V_k^2}{2} \rho \right)}; \quad V^* = \frac{3}{8} \cdot \frac{\psi_0 G_0 V_k}{d_0 \rho_n S g \sum \zeta};$$

$$n = V_n/V_k; \quad \bar{C} = C_0/V_k;$$

V_n, V_k — скорости падения конгломератов в начале и конце канала, м/с; $\sum \zeta$ — сумма коэффициентов аэродинамического сопротивления канала.

Как видно из полученных уравнений, заметную роль эрозия конгломератов играет лишь при $M^* \geq 0,02$, и то при больших параметрах V^* . При нагрузках $V^* < 1$ эрозию конгломератов при расчете объемов эжектируемого воздуха можно не учитывать. Заметное отклонение наблюдается при сопоставлении с результатами эжекции воздуха свободной струей конгломератов. Коэффициент эжекции потока частиц в канале намного меньше, что можно объяснить наличием зоны торможения в начале канала при малой начальной скорости падения. Ограничение свободной струи непроницаемыми стенками снижает эжектирующие свойства потока частиц.

Определив в соответствии с расчетными соотношениями (49) и (48) коэффициент эжекции, можем найти первое слагаемое уравнения (45):

$$Q_{ch} = \varphi V_k S,$$

что дает возможность определять необходимую производительность аспирационных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод снижения энергоемкости аспирационных укрытий и пылевых выбросов за счет уменьшения объема эжектируемого воздуха при перегрузках сыпучих материалов. Аналитически обоснована эффективность создания загрузочного устройства в виде вертикальной перфорированной трубы с байпасной камерой. Устройство комбинированной камеры с транзитным обменом воздуха между верхним неаспирируемым укрытием и приемной камерой нижнего аспирируемого укрытия повышает энергосберегающий эффект. Расход нагнетаемого в аспирируемое укрытие эжектируемого воздуха можно существенно уменьшить путем организации двойного циркулирования воздуха по внешнему кольцу с использованием торцевых отверстий байпасной камеры и по внутреннему кольцу, обеспечивающему перетекание воздуха через отверстия перфорации по всей длине желоба. Так, на конкретном примере при небольшой эжектирующей способности потока сыпучего материала, даже при одном внутреннем кольце рециркуляции, расход нагнетаемого воздуха был в 1,35 раза меньше по сравнению с расходом при перегрузке этого

же потока материала в желобе с непроницаемыми стенками и отсутствием байпасной камеры, при двойном кольце рециркуляции расход нагнетаемого воздуха был уменьшен в 1,78 раза. При больших числах эжекции эффект снижения расхода еще выше. При одном внешнем кольце циркуляции этот же расход при том же сопоставлении уменьшается в 1,72 раза, с двумя кольцами — в 4,29 раза.

На основе произведенных расчетов разработаны рекомендации для проектирования эффективных аспирационных систем при перегрузках сыпучих материалов с помощью телескопических погрузочных устройств.

Предложены новые конструкции пыле локализирующих устройств с закрученными воздушными потоками во внутренней полости корпуса. Теоретически обоснован метод повышения эффективности аспирационных укрытий за счет использования закрученных потоков. Предложена программно-алгоритмическая поддержка для исследования процессов пылеуноса в аспирационную сеть от локализирующих пылевыделения устройств и исследованы процессы динамики пылевых аэрозолей в за-

Библиографический список

1. **Аверкова, О. А.** Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / *О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, И. Н. Логачёв* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2010. — № 5. — С. 31–36.
- Averkova, O. A.** 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.
2. **Логачёв, К. И.** Расчеты щелевых отсосов, экранированных тонкими козырьками / *К. И. Логачёв, Н. М. Анжеуров* // Новые огнеупоры. — 2002. — № 7. — С. 38–41.
- 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.
3. **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.
- 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.
4. **Аверкова, О. А.** Моделирование отрыва потока на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* // Новые огнеупоры. — 2012. — № 10. — С. 56–60.
5. **Логачёв, И. Н.** Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузках сыпучих материалов / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 6. — С. 66–70.
6. **Логачёв, И. Н.** Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, В. Ю. Зоря* [и др.] // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 43–52.
7. **Логачёв, И. Н.** Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверко-*

крученных аспирируемых течениях. Показано, что значительного уменьшения пылеуноса в аспирационную сеть вплоть до полного осаждения пыли на конвейерную ленту можно достичь использованием вращающегося ротора или цилиндра-отсоса. Его положение, размеры, скорость вращения выбираются с помощью разработанной программно-алгоритмической поддержки.

Разработан метод расчета объема аспирации при перегрузках порошкообразных материалов с повышенными аутогезионными свойствами. Реализация технических решений позволила на ряде предприятий металлургического профиля, в частности в ОАО «Семилукский огнеупорный завод» (Россия, Воронежская область), получить устойчивый санитарный эффект — концентрация пыли в цехах снижена до уровня предельно допустимой, а также заметный экономический результат — мощность системы аспирации снижена в 1,3–1,5 раза.

* * *

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-103.2014.1) и программы стратегического развития БГТУ им. В. Г. Шухова (проект № А-10/12).

- ва* // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 68–77.
8. **Логачёв, И. Н.** Математическое моделирование струйного течения воздуха при входе в плоский канал с козырьком и непроницаемым экраном / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 2. — С. 160–167.
9. **Аверкова, О. А.** Моделирование потенциальных течений с неизвестными границами на основе стационарных дискретных вихрей / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* // Вычислительные методы и программирование. — 2011. — Т. 12, № 2. — С. 213–219.
10. **Аверкова, О. А.** Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы в областях с разрезами / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* // Вычислительные методы и программирование. — 2012. — Т. 13, № 2. — С. 298–306.
11. **Аверкова, О. А.** Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. — 2013. — Т. 44, № 2. — С. 33–49.
12. **Афанасьев, И. И.** Обеспыливание воздуха на фабриках горно-обогатительных комбинатов / *И. И. Афанасьев, И. Н. Логачёв, В. А. Минко* [и др.]. — М. : Недра, 1972. — 184 с.
13. **Нейков, О. Д.** Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков / *О. Д. Нейков, И. Н. Логачёв, В. А. Минко* [и др.]. — М. : Металлургия, 1981. — 192 с.
14. **Ординани, В.** Эффективность отсоса запыленного воздуха из укрытий / *В. Ординани* // Черные металлы (пер. с нем.). — 1975. — № 4. — С. 24, 25.
15. **Анжеуров, Н. М.** Оптимальные объемы аспирации перегрузок слипающихся порошков / *Н. М. Анжеуров, И. Н. Логачёв* // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2003. — С. 10–15. ■

*Получено 14.01.14
© И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв,
О. А. Аверкова, 2014 г.*