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

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

УДК 533.6:628.511

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ. ЧАСТЬ 1. ВЫВОД ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ЭЖЕКЦИИ ВОЗДУХА ПОТОКОМ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В ПЕРФОРИРОВАННОМ ЖЕЛОБЕ С БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ

Получены гидродинамические уравнения для исследования рециркуляции воздуха в вертикальной перфорированной трубе, размещенной в байпасной камере, при перемещении в ней потока сыпучего материала и эжектируемого воздуха. Рассмотрен случай, когда рециркуляция восходящего в байпасной камере воздуха осуществляется как через отверстия равномерной перфорации стенок желоба, так и через торцевые отверстия на концах байпасной камеры.

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

ВВЕДЕНИЕ

При растаривании сырья и фасовке сыпучих материалов в узлах их перегрузок ленточными конвейерами при погрузочно-разгрузочных работах в производстве огнеупорных изделий, многих других отраслях промышленности и сельского хозяйства нашли широкое применение аспирационные укрытия. Локализация пылевыделений с помощью аспирационных укрытий является достаточно простым и надежным способом, но остро стоит вопрос снижения их энергоемкости. В статье [1] сформулированы направления энергосбережения и разработана классификация способов и средств минимизации расхода воздуха, поступающего в аспирационные укрытия через неплотности и уменьшения объема воздуха, поступающего в укрытие по загрузочному желобу. В трудах [2–7] разрабатывался способ управления потоком на входе во всасывающие каналы, что дает возможность снизить объем воздуха, поступающего в укрытие через неплотности, на 20 %. Большего снижения энергоемкости систем аспирации можно добиться путем снижения объема воздуха, эжектируемого потоком сыпучего материала. Для этого во многих случаях применяют байпасные каналы, обеспечивающие внутренний рецикл воздуха, уменьшая тем самым поступление воздуха из перегрузочных желобов в аспирируемые укрытия. Известны решения, когда полости желоба соединены с байпасной камерой не только в верхней и нижней частях [8], но и по всей высоте желоба путем перфорации его стенок [9–11].

Целью настоящей работы является создание и теоретическое обоснование методов снижения энергоемкости системы аспирации за счет уменьшения объема аспирируемого воздуха и пылеуноса, а также совершенствование методов расчета пылевоздушных потоков. В частях 1 и 2 статьи обосновывается способ снижения объема эжекции за счет рециркуляции восходящего в байпасной камере воздуха, которая осуществляется как через отверстия равномерной перфорации стенок желоба, так и через торцевые отверстия на концах байпасной камеры. В части 3 по разработанной методике производится расчет телескопического погрузочного устройства и предлагаются меры по снижению энергозатрат на эксплуатацию системы аспирации. В части 4 предлагается новое направление снижения пылеуноса в аспирационную сеть за счет использования закрученных воздушных потоков. Часть 5 посвящена разработке метода расчета оптимального объема аспирации в условиях перегрузки слипающихся порошков.

✉

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

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим случай байпасной камеры с транзитным обменом воздуха между укрытиями перегрузочного узла при аспирации нижне-

го укрытия (рис. 1). В этом случае движение эжектируемого и рециркулируемого воздуха осуществляется не только вследствие аэродинамических сил падающих в желобе частиц перегружаемого материала, но и вследствие разрежения в нижнем укрытии, создаваемого вентилятором аспирационной системы. Причем рециркуляция восходящего в байпасной камере воздуха осуществляется как через отверстия равномерной перфорации стенок желоба, так и через торцевые отверстия на концах байпасной камеры. Через эти отверстия воздух поступает из внутренней камеры нижнего укрытия в полость байпасной камеры и выходит в полость верхнего неаспирируемого укрытия, снижая разрежение в последнем и уменьшая тем самым расход транзитного воздуха Q_1. По мере движения восходящего потока воздуха его расход увеличивается за счет непрерывного поступления через перфорационные отверстия стенок желоба эжектируемого воздуха в нижней части и уменьшается в верхней части байпасной камеры. Таким образом, имеем два кольца рециркулируемого воздуха: внутреннее малое кольцо, по которому циркулирует эжектируемый воздух, и внешнее большое кольцо, по которому осуществляется так называемый транзитный обмен воздуха между укрытиями перегрузочного узла.

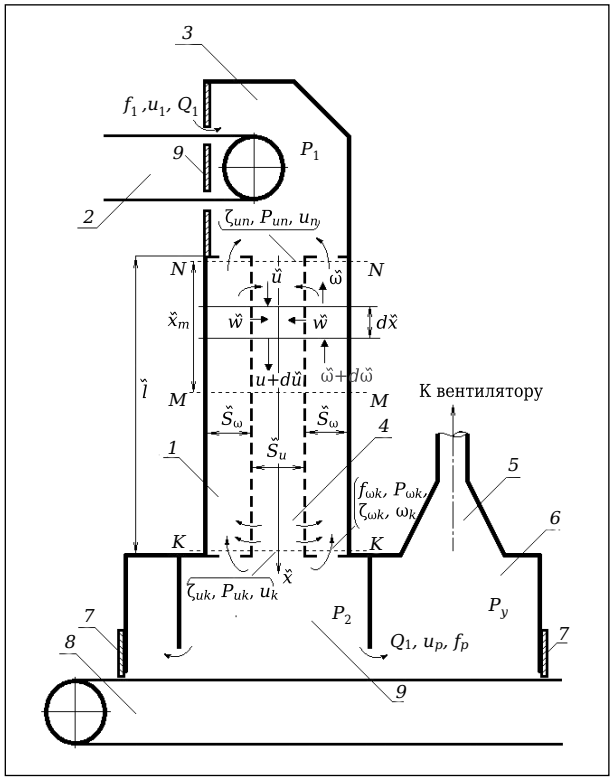

Рис. 1. Схема эжектируемого и рециркулируемого воздуха в желобе с комбинированной байпасной камерой: *1* — байпасная камера с транзитным проходом рециркулируемого воздуха; *2* — верхний конвейер; *3* — верхнее укрытие; *4* — желоб с перфорированными стенками; *5* — аспирационный патрубок; *6* — нижнее укрытие с внутренней камерой *9* для приема перегружаемого материала; *7* — уплотнительные фартуки; *8* — нижний конвейер

Количественная оценка объема рецикла воздуха и снижения расхода эжектируемого воздуха, поступающего в аспирируемое нижнее укрытие, отличается от рассмотренных ранее [9–11] тем, что скорость и величина статического давления на концах байпасной камеры, как и на концах перегрузочного желоба, неодинаковы. Это, несомненно, усложняет анализ минимизации расхода эжектируемого воздуха. Далее речь будет идти о решении системы трех нелинейных алгебраических (трансцендентных) уравнений, решение которых даже численными методами требует заметных усилий по времени счета. Что касается решения дифференциальных уравнений перетекания воздуха через перфорированные отверстия стенок желоба, используем приемы линеаризации неоднородного уравнения второго порядка.

Для формирования граничных условий выделим три характерных сечения: начальное $N - N$ (удаленное на бесконечно малое расстояние ε от начала координат, т. е. при $x^{\%} = 0 + \varepsilon^{\%}$), конечное $K - K$ (сечение при $x^{\%} = l^{\%} - \varepsilon^{\%}$) и промежуточно-экстремальное $M - M$ (сечение, удаленное на расстояние $x_m^{\%}$ от начала координат), в котором наблюдаются экстремальные скорости (расходы) эжектируемого и рециркулируемого воздуха.

Будем обозначать размерные величины верхним значком ~ (тильда), усредненные по длине $l^{\%}$ — нижним индексом s (или простой чертой над буквой), безразмерные величины — теми же буквами, но без тильды. Уравнения неразрывности в силу того, что сечения желоба и байпасной камеры постоянны и равны соответственно $S_u^{\%}$, м^2, и $S_\omega^{\%}$, м^2, а перфорация стенок желоба однородна по длине, примут вид:

$$\frac{du}{dx} = \frac{S_0^{\%}}{S_u^{\%}}\, w; \frac{d\omega}{dx} = \frac{S_0^{\%}}{S_\omega^{\%}}\, w, \qquad (1)$$

где $S_0^{\%}$ — суммарная площадь перфорационных отверстий стенок желоба, $S_0^{\%} = \Pi^{\%} l^{\%} \varepsilon_0$; $\Pi^{\%}$ — периметр сечения желоба, м; $l^{\%}$ — длина желоба, м; ε_0 — степень перфорации, безразмерная величина.

Учитывая, что отношение $r = S_\omega^{\%} / S_u^{\%}$ постоянно по длине, можем записать систему (1) в виде

$$du = r d\omega \Rightarrow u - r\omega = z - \text{const} = u_n - r\omega_n = u_k - r\omega_k. \qquad (2)$$

Для выяснения физической природы константы z запишем очевидный баланс расходов воздуха для укрытий:

$$\left.\begin{aligned} Q_1^{\%} + \omega_n^{\%} S_\omega^{\%} &= u_n^{\%} S_u^{\%}, \\ u_k^{\%} S_u^{\%} &= Q_1^{\%} + \omega_k^{\%} S_\omega^{\%} \end{aligned}\right\} \Leftrightarrow \begin{aligned} u_n^{\%} &= r\omega_n^{\%} + Q_1^{\%}/S_u^{\%}, \\ u_k^{\%} &= r\omega_k^{\%} + Q_1^{\%}/S_u^{\%}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где $Q_1^{\%}$ — расход транзитного воздуха, м^3/с; v_n и v_k — скорость частиц в начале и конце желоба со-

ответственно; u_n — проекция вектора скорости эжектируемого воздуха на внешнюю нормаль элементарной площадки; u_k — скорость эжектируемого воздуха в конечном сечении пористой трубы; ω_n — проекция вектора скорости восходящего потока воздуха в байпасной камере на внешнюю нормаль элементарной площадки; ω_k — скорость восходящего потока воздуха в байпасной камере в конечном сечении трубы. Сопоставляя эту систему уравнений с (2), имеем

$$z = \frac{Q_1^{\%}}{v_k^{\%} S_u^{\%}},$$

где константа z — отношение расхода «глобального транзитного» воздуха к максимально возможному расходу эжектируемого воздуха. В силу того, что $Q_1^{\%}$ является частью аспирируемого воздуха (общий объемный расход воздуха, аспирируемого из нижнего укрытия, $Q_a^{\%} = Q_1^{\%} + Q_{nm}^{\%}$, где $Q_{nm}^{\%}$ — объемный расход воздуха, поступающего через неплотности этого укрытия), константа z и является главной искомой величиной нашей задачи.

Укажем еще на одно важное соотношение, легко получаемое из баланса (3):

$$\frac{u_k - u_n}{\omega_k - \omega_n} = \frac{S_\omega^{\%}}{S_u^{\%}} \Rightarrow S_u^{\%}(u_k - u_n)v_k^{\%} = S_\omega^{\%}(\omega_k - \omega_n)v_k^{\%} = Q_R^{\%},$$

где $Q_R^{\%}$— объемный расход воздухообмена между потоком эжектируемого воздуха в желобе и потоком воздуха, рециркулируемого в байпасной камере, м^3/с.

Коэффициент рецикла определяется очевидным соотношением

$$R_z = \frac{Q_\omega^{\%}}{Q_u^{\%}} = \frac{r\omega_n}{u_k} = \frac{u_k - z}{u_k} = 1 - \frac{z}{u_k}.$$

Безразмерное уравнение динамики восходящего течения воздуха в байпасной камере имеет вид

$$dp_\omega + 4\omega d\omega = 0;\ p_\omega = 2p_\omega^{\%} / p^{\%} v_k^{\%};\ \omega = \omega^{\%} v_k^{\%}. \qquad (4)$$

Уравнение эжектируемого воздуха в перфорированном желобе:

$$dp + 4udu = \mathrm{Le}(v - u)|v - u| / v \cdot dx,\ \mathrm{Le} = 1{,}5\psi\beta_k l^{\%} / d_e^{\%}, \qquad (5)$$

где p — избыточное статическое давление в трубе; ψ — коэффициент лобового сопротивления частиц; β_k — объемная концентрация частиц в конце желоба; d_e — эквивалентный диаметр частиц сыпучего материала.

Заметим, что безразмерное число Le («параметр эжекции») представляет собой отношение максимальных сил эжекционного давления (при $v^{\%} - u^{\%} = v_k^{\%}$) и динамического давления эжектируемого воздуха.

Условие перетекания воздуха через перфорационные отверстия стенки желоба:

$$p_\omega - p_w = \zeta_0 |w| w.$$

Здесь w — безразмерная скорость перетекания воздуха, которую с учетом первого уравнения системы (1) можно выразить через изменение безразмерной скорости эжектируемого воздуха:

$$w = \frac{1}{E\sqrt{\zeta_0}} \frac{du}{dx}, \qquad (6)$$

где E — безразмерный параметр, характеризующий степень перфорации стенки желоба и коэффициент местных сопротивлений (к.м.с.) ζ_0 отверстий, равный в наших обозначениях

$$E = \frac{S_0^{\%}}{S_u^{\%}\sqrt{\zeta_0}}.$$

Прежде чем перейти к интегрированию уравнений (4) и (5), сформулируем краевые условия.

Не снижая общности рассматриваемой задачи, будем полагать, что площади конечных сечений желоба и байпасной камеры равны соответственно площади поперечного сечения желоба и камеры[*1]. В этой связи краевые условия для скорости воздуха запишем в следующем виде:

в начальном сечении N–N (при $x = 0$)

$$u(0) = u_n;\ \omega(0) = \omega_n; \qquad (7)$$

$$w(0) = \frac{u'(0)}{E\sqrt{\zeta_0}} = \gamma_w(0)\sqrt{\frac{|p_\omega(0) - p_u(0)|}{\zeta_0}},\ \gamma_w(0) = \mathrm{signum}(p_\omega(0) - p_u(0)); \qquad (8)$$

в конечном сечении K–K (при $x = 1$)

$$u(1) = u_k;\ \omega(1) = \omega_k; \qquad (9)$$

$$w(1) = \frac{u'(1)}{E\sqrt{\zeta_0}} = \gamma_w(1)\sqrt{\frac{|p_\omega(1) - p_u(1)|}{\zeta_0}},\ \gamma_w(1) = \mathrm{signum}(p_\omega(1) - p_u(1)). \qquad (10)$$

Краевые условия для статических давлений выразим через к.м.с. и величины избыточных давлений p_1, p_2 в укрытии перегрузочного узла:

в начальном сечении N–N

$$\left.\begin{aligned} p_u(0) &= p_1 - \zeta_{un} u_n^2; \\ p_\omega(0) &= p_1 - \zeta_{\omega n} \omega_n^2; \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

в конечном сечении K–K

$$\left.\begin{aligned} p_u(1) &= p_2 - \zeta_{uk} u_k^2; \\ p_\omega(1) &= p_2 - \zeta_{\omega k} \omega_k^2; \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

где ζ_{un}, ζ_{uk} — к.м.с. соответственно входу эжектируемого воздуха в желоб и выходу его из желоба; $\zeta_{\omega n}$, $\zeta_{\omega k}$ — к.м.с. соответственно выходу восходящего потока воздуха из байпасной камеры и входу его в эту камеру; p_1, p_2 — избыточные

[*1] При необходимости устройства суженых сечений это обстоятельство можно учесть при помощи увеличения коэффициента местных сопротивлений отверстия в результате пересчета его величины на скорость в сечении желоба или камеры.

статические давления соответственно в верхнем (неаспирируемом) укрытии и в приемной камере нижнего (аспирируемого) укрытия; γ_w — знак разности $p_\omega - p_u$ (т. е. +1, если эта разность положительна и –1, если она отрицательна). Величины p_1 и p_2 могут быть выражены через к.м.с. неплотностей верхнего укрытия ζ_1, перегородки приемной камеры ζ_p, безразмерного разрежения в нижнем укрытии py и искомого параметра z:

$$p_1 = -\zeta_1\left(\frac{S_u^{\%}}{f_1^{\%}}\right)^2 z^2 = -\zeta_1^* z^2,\ \zeta_1^* = \zeta_1\left(\frac{S_u^{\%}}{f_1^{\%}}\right)^2; \quad (13)$$

$$p_2 = p_2 + \zeta_p\left(\frac{S_u^{\%}}{f_1^{\%}}\right)^2 z^2 = p_y + \zeta_p^* z^2,\ \zeta_p^* = \zeta_p\left(\frac{S_u^{\%}}{f_p^{\%}}\right)^2, \quad (14)$$

где $f_1^{\%}$ — суммарная площадь неплотностей верхнего укрытия, м^2; $f_p^{\%}$ — суммарная площадь зазора между стенками приемной камеры нижнего укрытия и груженой конвейерной лентой, м^2; $S_u^{\%}$ — площадь поперечного сечения желоба, м^2.

ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ БАЙПАСИРОВАНИЯ НЕПЕРФОРИРОВАННОГО ЖЕЛОБА

Прежде чем перейти к решению поставленной задачи определения параметра z при устройстве комбинированной байпасной камеры, рассмотрим случай перегрузки сыпучего материала по желобу с непроницаемыми стенками (при $\zeta_1 \to \infty$, $E = 0$). Задача упрощается тем, что с небольшой погрешностью можно записать

$$u_n = u_k = u \equiv u_c - \text{const},$$
$$\omega_n = \omega_k = \omega \equiv \omega_c - \text{const}. \quad (15)$$

В этом случае возможно интегрирование уравнения динамики эжектируемого воздуха (5) в конечном виде, например при равноускоренном потоке падающих частиц, скорость которых

$$v = \sqrt{(1-n^2)x + n^2};\ n = v_0^{\%}/v_k^{\%}$$

может служить в качестве независимой переменной интегрирования ($v_0^{\%}$ — скорость частиц при входе в желоб).

Исходное уравнение при этом, в силу того что

$$dx = \frac{2v dv}{1-n^2},$$

примет простой вид

$$dp_y = \frac{2\mathrm{Le}}{1-n^2}(v - u_c)|v - u_c|dv.$$

Конечное решение этого уравнения при краевых условиях (11), (12) и с учетом (15) после несложных преобразований можно записать в виде следующего критериального уравнения[*2]:

$$\mathrm{Eu} + u_c|u_c| = \mathrm{Bu}\frac{|1 - u_c|^3 - |n - u_c|^3}{3}, \quad (16)$$

где Eu — критерий Эйлера, равный

$$\mathrm{Eu} = \frac{p_2 - p_1}{\zeta_u}; \quad (17)$$

Bu — критерий Бутакова–Нейкова, вычисляемый по формуле

$$\mathrm{Bu} = \frac{2\mathrm{Le}}{\zeta_u(1 - n^2)};$$

ζ_u — сумма к.м.с. желоба, $\zeta_u = \zeta_{un} + \zeta_{uk}$.

Заметим, что в силу уравнений (13) и (14) число Эйлера можно выразить через к.м.с. неплотностей верхнего укрытия ζ_1^* и перегородки приемной камеры ζ_p^*, отнесенных к скорости эжектируемого воздуха u_c:

$$\mathrm{Eu} = \frac{\zeta_n^* z_c|z_c| + p_y}{\zeta_u}, \quad (18)$$

где

$$z_c = u_c - r\omega_c,$$
$$\zeta_n^* = \zeta_1^* + \zeta_p^*. \quad (19)$$

С другой стороны, из уравнения (4) при $\omega = \omega_c$, $dp_\omega = 0$, с учетом тех же краевых условий для давлений, получим

$$p_2 - p_1 = \zeta_\omega\omega_c|\omega_c|,$$

ζ_ω — сумма к.м.с. байпасной камеры, $\zeta_\omega = \zeta_{\omega n} + \zeta_{\omega k}$, и потому критерий Эйлера Eu (17) можем записать через скорость восходящего потока ω_c:

$$\mathrm{Eu} = \frac{\zeta_\omega}{\zeta_u}\omega_c|\omega_c|. \quad (20)$$

С учетом этого результата перепишем уравнение (16) в виде следующего равенства:

$$\frac{\zeta_\omega}{\zeta_u}\omega_c|\omega_c| + u_c|u_c| = \mathrm{Bu}\frac{|1 - u_c|^3 - |n - u_c|^3}{3},$$

решая которое с учетом (19) и уравнения

$$\frac{\zeta_\omega}{\zeta_u}\omega_c|\omega_c| = \zeta_n^* z_c|z_c| + p_y,$$

полученного из сопоставления правых частей соотношений (18) и (20), найдем следующие уравнения для определения параметра z_c, скорости эжектируемого воздуха в желобе u_c и скорости восходящего потока рециркулируемого воздуха в байпасной камере ω_c:

$$\frac{f}{\zeta_u} + F|F| = \mathrm{Bu}\frac{|1 - F|^3 - |n - F|^3}{3}, \quad (21)$$

$$u_c = F;\ \omega_c = \frac{f}{\sqrt{\zeta_\omega|f|}}, \quad (22)$$

[*2] Здесь и далее вместо квадрата скорости принята форма записи $u|u|$, обеспечивающая расширение области применения уравнений на область отрицательных значений скорости.

где для простоты записи введены функции от параметра z_c:

$$f = \zeta_n^* z_c |z_c| + p_y,\ F = z_c + \frac{rf}{\sqrt{\zeta_\omega |f|}}.$$

Определив решением уравнения (21) величину z_c, можно найти расход воздуха $Q_1^{\%}$ (м³/с), нагнетаемого в нижнее укрытие в результате динамического взаимодействия потока сыпучего материала и разрежения в укрытии:

$$Q_1^{\%} = z_c^{\%}\, v_k^{\%}\, S_u^{\%},$$

а также расход рециркулируемого воздуха в байпасной камере:

$$Q_k^{\%} = \omega_c^{\%}\, v_k^{\%}\, S_\omega^{\%}$$

и расход воздуха $Q_u^{\%}$ (м³/с), поступающего из желоба во внутреннюю камеру:

$$Q_u^{\%} = u_c^{\%}\, v_k^{\%}\, S_u^{\%}.$$

Естественно, при изотермических условиях должен соблюдаться очевидный баланс этих расходов:

$$Q_1 + Q_k = Q_u.$$

Легко определить и расход воздуха, поступающего из желоба в нижнее укрытие при закрытых торцевых отверстиях байпасной камеры (т. е. при $Q_k^{\%} = 0$). Для этого необходимо решить уравнение (16) с учетом того, что $u_c = u_0 - z_c$ и потому

$$\mathrm{Eu}_0 + u_c|u_c| = \mathrm{Bu}\,\frac{|1 - u_0|^3 - |n - u_0|^3}{3}, \qquad (23)$$

где Eu_0 в силу уравнения (18) имеет вид

$$\mathrm{Eu}_0 = \frac{\zeta_n^* u_0^2 + p_y}{\zeta_u}.$$

Определив из уравнения (23) безразмерную скорость эжектируемого воздуха u_0, найдем расход воздуха

$$Q_0 = u_0\, v_k^{\%}\, S_u^{\%},$$

поступающего из желоба в нижнее укрытие при отсутствии байпасной камеры.

Как показали расчеты на «опытном» примере перегрузочного узла (рис. 2, 3), расход этого воздуха заметно возрос по сравнению с объемом при перегрузке по желобу при наличии байпасной камеры с малым аэродинамическим сопротивлением ($\zeta_\omega < 2$) и небольшой площадью неплотностей верхнего укрытия ($f_1 < 0{,}2$ м²), особенно при больших числах эжекции (Le > 5). С ростом параметра эжекции Le изменяется и коэффициент рецикла R_z (см. рис. 3) от –1 до положительных «асимптотических» величин при Le ≥ 3. Отрицательные величины R_z при малых величинах Le объясняются тем, что из-за большого разрежения в нижнем укрытии ($p_3 \le -10$) и малой эжекти-

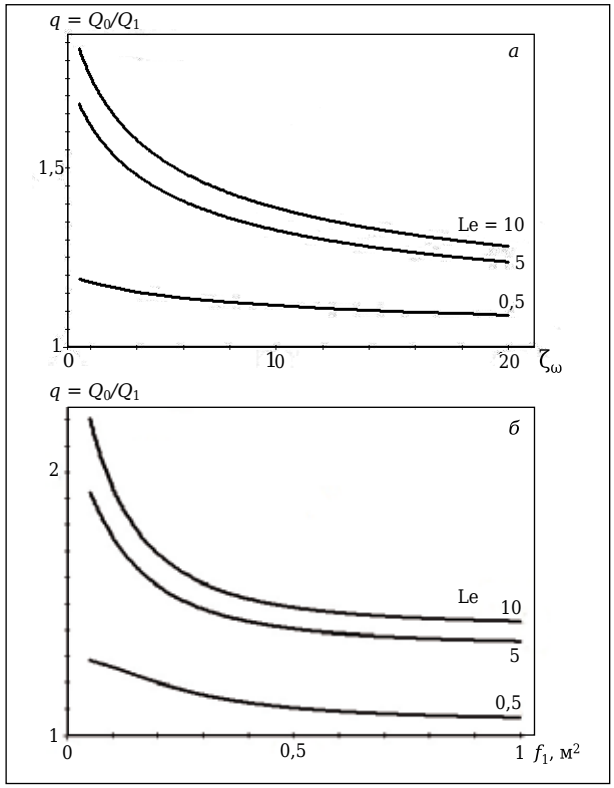

Рис. 2. Изменение относительного расхода воздуха $q = Q_0/Q_1$, нагнетаемого в нижнее укрытие потоком сыпучего материала, в зависимости от к.м.с. байпасной камеры ζ_ω (*а*) и от площади неплотностей верхнего укрытия f_1 (*б*) при $v_0 = 3$ м/с; $v_k = 10$ м/с; $P_3 = -10$ Па; Q_1 — с байпасной камерой; Q_0 — при $\zeta_\omega \to \infty$ (при отсутствии байпасной камеры): *а* — при $S_u = 0{,}3$ м², $f_1 = f_p = 0{,}3$ м³, $\zeta_u = 1{,}5$, $\zeta_1 = \zeta_p = 2{,}4$; *б* — при $S_u = S_\omega = 0{,}3$ м², $f_p = 0{,}3$ м³, $\zeta_u = 1{,}5$, $\zeta_\omega = 4$, $\zeta_1 = \zeta_p = 2{,}4$

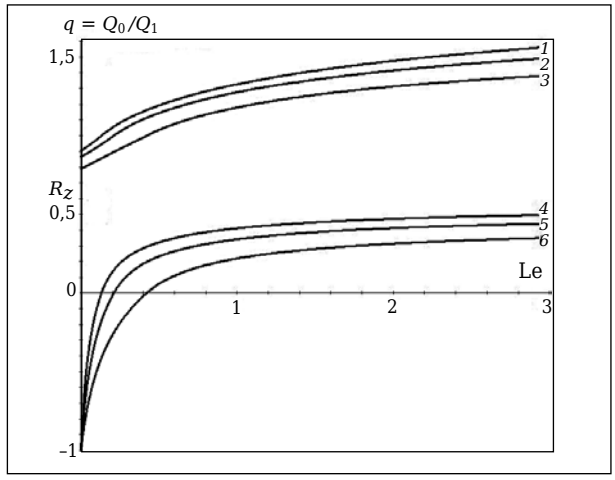

Рис. 3. Изменение относительного расхода воздуха $q = Q_0/Q_1$, нагнетаемого в нижнее укрытие в результате эжекции потока сыпучего материала, и степени рецикла эжектируемого воздуха в зависимости от числа Le при $S_u = S_\omega = 0{,}3$ м², $f_1 = f_p = 0{,}3$ м³, $v_k = 10$ м/с, $\zeta_1 = \zeta_p = 2{,}4$, $n = 0{,}3$, разрежении в укрытии, создаваемом вентилятором аспирационной установки, $P_3 = -10$ Па: *1* — q при $\zeta_u = \zeta_\omega = 1{,}5$; *2* — q при $\zeta_u = \zeta_\omega = 2{,}4$; *3* — q при $\zeta_u = \zeta_\omega = 4{,}8$; *4* — R_z при $\zeta_u = \zeta_\omega = 1{,}5$; *5* — R_z при $\zeta_u = \zeta_\omega = 2{,}4$; *6* — R_z при $\zeta_u = \zeta_\omega = 4{,}8$

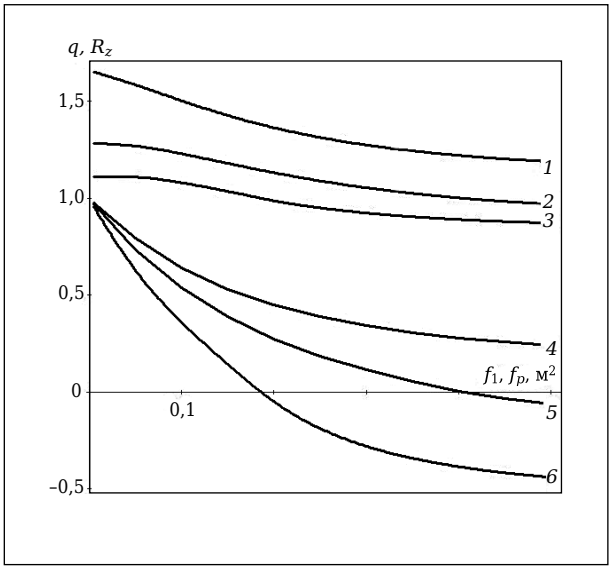

Рис. 4. Изменение относительного расхода воздуха $q = Q_0/Q_1$ и степени рецикла эжектируемого воздуха R_z в зависимости от площади неплотностей верхнего укрытия f_1 (при f_p = 0,3 м³) или от площади зазора приемной камеры f_p (при f_1 = 0,3 м³) при $S_u = S_\omega$ = 0,3 м², $\zeta_1 = \zeta_p = \zeta_u = \zeta_\omega$ = 2,4, v_k = 10 м/с, n = 0,3, P_3 = –10 Па: *1* — q при Le = 1,0; *2* — q при Le = 0,3; *3* — q при Le = 0,1; *4* — R_z при Le = 1,0; *5* — R_z при Le = 0,3; *6* — R_z при Le = 0,1

рующей способности потока сыпучего материала байпасная камера выполняет роль параллельного воздуховода, по которому из верхнего укрытия воздух поступает в приемную камеру — наблюдается «отрицательный рецикл» ($\omega_c < 0$, $q < 1$). Этого можно избежать, увеличив аэродинамическое сопротивление ζ_n^* и уменьшив площади неплотностей f_1 и f_p (рис. 4).

Заметна роль герметизации верхнего укрытия и устройства приемной камеры с небольшими зазорами для прохода материала. Естественно, при отсутствии этой камеры «положительная» рециркуляция возможна лишь в случае, когда разрежение в верхнем укрытии за счет хорошей герметизации будет больше разрежения, создаваемого вентилятором в нижнем укрытии.

* * *

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).

Библиографический список

1. ***Логачёв, И. Н.*** Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 6. — С. 66–70.

Logachev, I. N. Methods and Means of Reducing the Power Requirements of Ventilation Systems in the Transfer of Free-Flowing Materials / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 258–262.

2. ***Аверкова, О. А.*** Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / *О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, К. И. 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, K. I. Logachev* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 3. — P. 177–182.

3. ***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.

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. ***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.

6. ***Аверкова, О. А.*** Моделирование отрывных потоков на входе в круглые всасывающие каналы с кольцевыми экранами / *О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 57–61.

7. ***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.

8. ***Logachev, I. N.*** Industrial Air Quality and Ventilation: Controlling Dust Emissions / *I. N. Logachev, K. I. Logachev* // CRC Press, 2014. — 415 p.

9. ***Логачёв, И. Н.*** Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 1. Уравнения динамики эжектируемого и рециркулируемого воздуха / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 46–53.

10. ***Логачёв, И. Н.*** Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 2. Линеаризация дифференциальных уравнений / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 11/12. — С. 62–70.

11. ***Логачёв, И. Н.*** Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 3. Численный эксперимент и результаты исследований / *И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова* // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 1. — С. 79–87. ■

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