

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

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

УДК 533.6:628.5

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОГО РАСХОДА АСПИРИРУЕМОГО ВОЗДУХА ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

На основе гидродинамических уравнений эжектируемого и рециркулируемого воздушных потоков воздуха в системе загрузочная телескопическая труба – байпасная камера разработана методика определения расхода воздуха, увлекаемого сыпучим материалом, и необходимого расхода аспирируемого воздуха. Показано, что энергоемкость аспирационно-технологических установок телескопических станций можно существенно снизить путем применения коаксиально расположенных загрузочных телескопических желобов и расположенных вокруг них гофрированных непроницаемых стенок, а также герметизацией верхних и нижних укрытий, примыкающих к ним.

**Ключевые слова:** системы аспирации, обеспыливающая вентиляция, перегрузка сыпучих материалов, телескопические погрузчики, эжекция воздуха потоком сыпучего материала.

## ВВЕДЕНИЕ

**Н**аиболее распространенная конвейерная перегрузка пылящих материалов обычными закрытыми желобами характерна тем, что гравитационные потоки частиц при падении создают эжекционные струи запыленного воздуха, которые поступают в укрытия места падения — места загрузки нижних конвейеров или питателей, бункеров, дробилок, грохотов и другого технологического оборудования.

Для исключения выбивания запыленного воздуха из этих укрытий в окружающую атмосферу осуществляется их максимально возможное уплотнение и отсос воздуха для создания разрежения воздуха в полостях не только нижних укрытий, но и других, аэродинамически связанных с аспирируемыми укрытиями. Необходимый объем отсасываемого воздуха  $Q_a$  (объем аспирации) для простейшего случая перегрузки с конвейера на конвейер определяется суммой расходов воздуха, поступающего в укрытие через неплотности,  $Q_n$  и воздуха, поступающего по желобу,  $Q_g$ , где  $Q_n = \mu F_a \sqrt{2P_y / \rho_0}$  зависит от площади неплотности  $F_a$ ,  $m^2$ , и величины разрежения, поддерживаемого в укрытии,  $P_y$ , Па, для исключения истечения запыленного воздуха,  $\mu = 1/\sqrt{\zeta}$  — коэффициент расхода, связанный с

коэффициентом местных сопротивлений неплотности (для малых отверстий  $\zeta = 2,4$  и потому  $\mu = 0,65$ );  $\rho_0$  — плотность окружающего воздуха. Снижению  $Q_n$  посвящены работы [1–3].

Намного сложнее определяется величина  $Q_g$ , часто называемая расходом эжектируемого воздуха. Развитие компьютерной техники позволило от эмпирических формул [4–6] перейти к фундаментальным исследованиям нагнетания воздуха по желобам или в свободных струях на основе использования классической теории механики двухкомпонентных потоков и значительных объемов экспериментальных исследований аэродинамики равноускоренного потока в желобах и струях дискретных частиц [7–13].

Значительно усложняется расчет эжектируемого воздуха в желобах загрузочных телескопических станций. Загрузочные станции небольшой объемной производительности (до 250  $m^3/ч$ ) типа ТЗС 500 JETPAC, как и телескопические погрузчики значительной производительности (до 1500  $m^3/ч$ ) типа ПУ-700, получившие применение в морских терминалах, отличаются тем, что имеют не только переменную высоту загрузки, но и состоят из двух соосных труб. Причем полость внутренней трубы, по которой перемещается загружаемый материал, аэродинамически связана с полостью, ограниченной непроницаемой наружной стенкой внешней трубы и внутренней «проницаемой» стенкой. Это обстоятельство способствует появлению рециркуляции эжектируемого воздуха и влечет за собой изменение объема воздуха, нагнетаемого в нижнее укрытие (приемную емкость),



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

по сравнению с объемом воздуха, поступающего по желобу, имеющему непроницаемые стенки.

На настоящий момент методика расчета эжекции воздуха в проницаемых желобах не разработана. Только в 2015 г. вышла монография [8], в которой рассмотрены методические вопросы эжектирования при переменной скорости частиц и воздуха в проницаемых желобах и теоретически доказана энергоэффективность рецикла воздуха, позволяющего заметно снизить оптимальную производительность аспирационной системы.

Цель настоящей работы — создание методики расчета расхода воздуха, увлекаемого потоком сыпучего материала, в системе загрузочный проницаемый канал – байпасная камера.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В основу методики положены полученные в монографии [8] линеаризованные уравнения динамики эжектируемого и рециркулируемого воздуха (рис. 1) с одним кольцом рецикла воздуха в проницаемом желобе при обычном (схема а) и комбинированном байпасировании (схема б), т. е. с рециклом воздуха по двум кольцам циркуляции, при котором эжектируемый по центральному каналу воздух разделяется в нижней части телескопического желоба и поступает в байпасную камеру (внутренний рецикл).

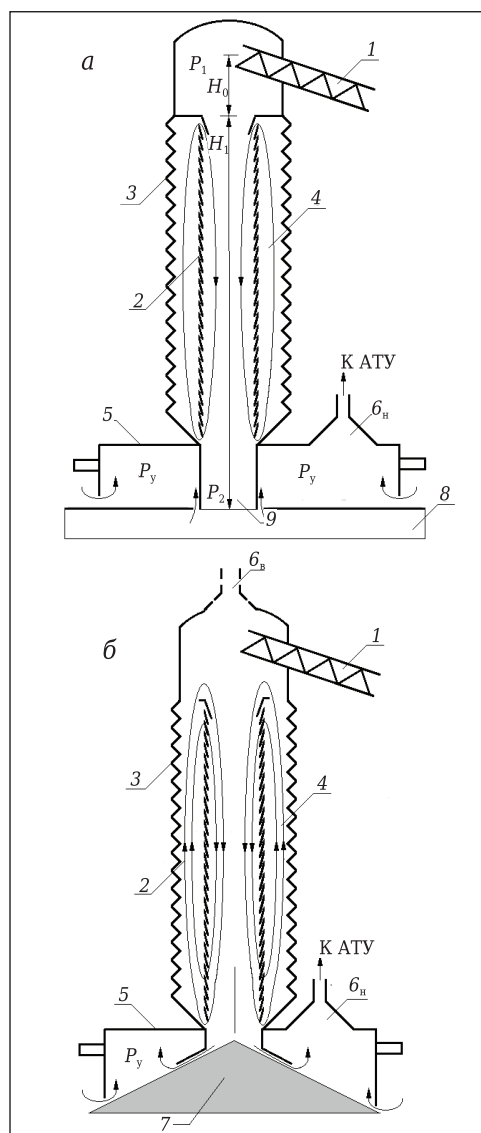
Транзитный поток воздуха при выходе из желоба разделяется, в свою очередь, на две ветви. Часть воздуха поднимается вверх по байпасной камере 4 (см. рис. 1) в верхнее укрытие, а оставшаяся часть с расходом  $Q_g$  поступает через герметизирующие фартуки в аспирируемую камеру, откуда удаляется аспирационным патрубком. Общая производительность патрубков определяется суммой

$$Q_a = Q_n + Q_g,$$

где  $Q_n$  — расход воздуха, поступающего через неплотности внешних уплотняющих фартуков за счет разрежения  $P_y$ , создаваемого вентилятором аспирационной системы.

Необходимо определить главное слагаемое балансового уравнения  $Q_g$ .

Исходные данные для расчета:  $G_m$  — массовый расход перегружаемого материала, кг/с;  $H_1$  — высота желоба, м;  $d_1$  — диаметр верхнего основания секции телескопической трубы, м;  $d_2$  — диаметр нижнего ( $d_2 < d_1$ ) основания этой секции, м; диаметр наружного рукава желоба  $D_n$ , м;  $z_c$  — средний зазор между смежными секциями желоба,  $z_c = (d_1 - d_2)/2$ , м;  $D_1$  — условный диаметр желоба, м,  $D_1 = (d_1 + d_2)/2$ ;  $S_g$  — площадь поперечного сечения желоба,  $m^2$ ,  $S_g = \pi D_1^2 / 4$ ;  $f_{zo}$  — условная площадь живого сечения одного зазора,  $m^2$ ,  $f_{zo} = \pi D_1 z_c$ ;  $N_g$  — число секций в телескопической трубе;  $S_z$  — суммарная площадь всех зазоров,  $m^2$ ,  $S_z = f_{zo} N_g$ ;  $S_w$  — площадь байпасной камеры,  $m^2$ ,  $S_w = \pi(D_n^2 - D_1^2)/4$ ;  $r = S_w / S_g$ ;  $e_s$  — относительная



**Рис. 1.** Расчетная схема аспирации загрузки закрытого транспортного средства при помощи ТЗС 1000 JETRAPACK: 1 — загрузочный шнек; 2 — телескопическая труба (желоб); 3 — гофрированная внешняя непроницаемая труба; 4 — байпасная камера с закрытыми (схема а) верхним и нижним днищами и с открытыми (схема б) днищами; 5 — аспирационный патрубок; 6<sub>н</sub> — верхний аспирационный патрубок; 6<sub>с</sub> — нижний аспирационный патрубок; 7 — штабель зернистого перегружаемого материала; 8 — закрытая емкость; 9 — загрузочная горловина; АТУ — аспирационно-технологическая установка

степень проницаемости,  $e_s = S_z / S_g$ ;  $\zeta_o$  — к. м. с. (коэффициент местного сопротивления) отверстия зазора;  $\zeta_m$  — к. м. с. отверстий неплотностей наружной стенки аспирационного укрытия;  $E$  — степень перетекания воздуха через рефракционные отверстия желоба,  $E = e_s / \sqrt{\zeta_o}$ ;  $S_{nw}$  — площадь неплотностей верхнего укрытия,  $m^2$ ;  $S_{nk}$  — площадь неплотностей нижнего укрытия (приемной камеры),  $m^2$ ;  $\zeta_{nw}$  — коэффициент местных сопротивлений входу воздуха через неплотности верхнего укрытия,  $\zeta_{nw} = 2,4(S_g / S_{nw})^2$ ;

$\zeta_{nk}$  — коэффициент местных сопротивлений входу воздуха через неплотности нижнего укрытия,  $\zeta_{nk} = 2,4(S_g / S_{nk})^2$ ;  $P_y$  — разрежение в аспираторной камере нижнего укрытия, Па;  $F_a$  — площадь неплотностей наружной стенки аспираторной камеры;  $\psi_0$  — коэффициент лобового сопротивления одиночной частицы;  $\rho_m$  — плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_g$  — плотность воздуха в желобе, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_w$  — плотность наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $d_e$  — эквивалентный диаметр частиц, мм;  $H_0$  — высота падения частиц, м;  $v_n$  — скорость частиц при входе в желоб, м/с,  $v_n = \sqrt{2gH_0}$ ;  $v_k$  — скорость частиц при выходе из желоба, м/с,  $v_k = \sqrt{2g(H_1 + H_0)}$ ;  $n$  — отношение скоростей падения частиц,  $n = v_n / v_k$ ;  $p_y$  — безразмерное разрежение в аспираторной камере нижнего укрытия,  $p_y = 2P_y / (\rho_g v_k^2)$ .

После формирования исходных данных расчет проводится в следующей последовательности.

1. Определяется объемная концентрация падающих частиц в конце телескопического желоба:  $\beta_k = \frac{G_m}{v_k \rho_m S_g}$  и посередине этого желоба:

$$\beta_y = \frac{2G_m}{v_k(1+n)\rho_m S_g}.$$

2. Вычисляется средний коэффициент лобового сопротивления падающих частиц по формуле:  $\psi = \psi_0 \exp[-56,92 \sqrt{\beta_y / d_e}]$ .

3. Определяется параметр эжекции:  $Le = \frac{\psi \beta_k H_1 \cdot 1500}{d_e}$ .

4. Вычисляется усредненная скорость падения частиц в телескопической трубе:

$$v_s = b_0 + \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{6}b_2,$$

где коэффициенты определяются по формулам  $b_0 = n$ ;  $b_1 = \sqrt{8(1+n^2) - 3n - 1}$ ;  $b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)})$ ,  $n = v_n / v_k$ .

5. Осредненные скорости эжектируемого воздуха в телескопическом желобе  $u_s$ , скорости восходящего рециркулируемого воздуха в байпасной камере  $\omega_s$  и скорости воздуха, перетекаемого из желоба через отверстия боковой стенки камеры,  $w_s$  выражаются через неизвестный параметр  $u_n$ :

$$u_s = v_s - \sqrt{\frac{v_s(\zeta_p u_n^2 - p_y)}{Le}}, \quad w_s = u_n \sqrt{\frac{0,25 + \zeta_n + |0,25 - \zeta_k|}{3\zeta_0}},$$

$$\omega_s = \frac{u_s - u_n}{r},$$

где  $\zeta_p = \zeta_n + \zeta_k$ ,  $\zeta_n = \zeta_{nw} + 0,5$ ,  $\zeta_k = \zeta_{nk} + 1$ .

6. Через записанные на предыдущем этапе величины вводятся функции, параметры, коэффициенты:

$$A = 2\left(u_s - \frac{\omega_s}{r}\right) \frac{E}{w_s \sqrt{\zeta_0}}; \quad B = \left(1 - \frac{u_s}{v_s}\right) \frac{Le \cdot E}{w_s \sqrt{\zeta_0}}; \quad k_2 = 2b_2 \frac{A}{B};$$

$$k_1 = 2 \frac{A}{B} (b_1 - k_2) - b_2 / B; \quad a_1 = A + \sqrt{A^2 + B}; \quad a_2 = A - \sqrt{A^2 + B};$$

$$a_3 = n - k_1; \quad b_3 = 1 - k_1 - k_2; \quad a_4 = b_1 - k_2;$$

$$b_4 = b_1 + b_2 - k_2; \quad z_1 = e^{a_1} - e^{a_2};$$

$$C_1 = \frac{u_n(1 - e^{a_2}) + a_3 e^{a_2} - b_3}{z_1}; \quad C_2 = \frac{u_n(e^{a_1} - 1) - a_3 e^{a_1} + b_3}{z_1}$$

и путем решения трансцендентного уравнения

$$(\zeta_p u_n^2 - p_y) \frac{E}{w_s \sqrt{\zeta_0}} - (C_1 a_1 (1 - e^{a_1}) + C_2 a_2 (1 - e^{a_2}) + a_4 - b_4) = 0$$

определяется безразмерная скорость  $u_n$  эжектируемого воздуха при входе (и выходе) в телескопический желоб.

7. Производится расчет скорости  $u(x)$  в произвольных сечениях желоба на отрезке  $x = 0, \dots, 1$ :  $u(x) = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + b_0 - k_1 + x(b_1 - k_2) + \frac{b_2}{2} x^2$

и интегрированием функции  $u(x)$  на том же отрезке определяется средняя скорость

$$u_s = \frac{C_1}{a_1} (e^{a_1} - 1) + \frac{C_2}{a_2} (e^{a_2} - 1) + b_0 + \frac{b_1 - k_2}{2} + \frac{b_2}{6} - k_1.$$

8. Находится сечение  $x_m$  путем решения уравнения

$$C_1 a_1 e^{a_1 x_m} + C_2 a_2 e^{a_2 x_m} + b_1 + b_2 x_m - k_2 = 0$$

и рассчитывается максимальная величина безразмерной скорости эжектируемого воздуха

$$u_m = C_1 e^{a_1 x_m} + C_2 e^{a_2 x_m} + b_0 - k_1 + x_m(b_1 - k_2) + \frac{b_2}{2} x_m^2.$$

9. Определяются максимальные объемные расходы воздуха в сечении  $x = x_m$ . В телескопическом желобе  $Q_m$  рассчитывается по формуле  $Q_m = 3600 u_m v_k S_g$ , рециркулируемого в байпасной камере  $Q_r$  по формуле  $Q_r = 3600 (u_m - u_n) v_k S_g$  и разности этих расходов, т. е. величина  $Q_0 = Q_m - Q_r$ .

10. Вычисляется безразмерное избыточное давление на днище байпасной камеры  $p_a$  в соответствии с формулой

$$p_a = 0,5((\zeta_k - \zeta_n) u_n^2 - p_y) + w_s \frac{\sqrt{\zeta_0}}{2E} [C_1 a_1 (1 + e^{a_1}) + C_2 a_2 (1 + e^{a_2}) + a_4 + b_4].$$

11. Выполняются с шагом  $x = 0,1$  (на отрезке  $x = 0, \dots, 1$ ) расчеты следующих безразмерных функций:

$u(x)$  по формуле

$$u = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + b_0 - k_1 + x(b_1 - k_2) + \frac{b_2}{2} x^2,$$

$$p_w(x) \text{ по формуле } p_w(x) = p_a - \frac{4\omega_s}{r} (u(x) - u_n),$$

$p(x)$  по формуле

$$p(x) = p_w(x) - \frac{w_s \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 - k_2 + b_2 x),$$

разности давлений по формуле  $\Delta p(x) = -p(x) + p_w(x)$ ,

$$w(x) \text{ по формуле } w(x) = \frac{\Delta p(x)}{\zeta_0 w_s}.$$

Для анализа изменения вышеупомянутых функций удобно в первом столбце выводить значения аргумента  $x$ , равные 0, 0,1, 0,2, ..., 1, во втором величины  $u(x)$ , в третьем —  $w(x)$ , в четвертом —  $p(x)$ , в пятом —  $p_w(x)$  и в шестом —  $\Delta p(x)$ .

12. Производится расчет безразмерной скорости эжектируемого воздуха  $u_2$  из уравнения

$$\frac{3}{[1-u_2]^3 - [n-u_2]^3} - \frac{2Le}{(\zeta_p u_n^2 - p_y)(1-n^2)} = 0,$$

и его расхода  $Q_2 = 3600u_2 v_k S_g$ , м<sup>3</sup>/ч, для случая полной герметизации стенок желоба, т. е. при отсутствии рецикла воздуха в байпасной камере.

13. Вычисляются расход воздуха, поступающего из желоба в аспирируемое укрытие, по формуле  $Q_g = 3600u_n v_k S_g$ , м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха, поступающего в это же укрытие через неплотности, из

$$\text{уравнения } Q_n = 3600F_a \sqrt{\frac{2P_y}{\zeta_m \rho_w}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \text{ необходимый}$$

расход воздуха, удаляемого из аспирационного укрытия, равен  $Q_a = Q_g + Q_n$ .

### Пример расчета аэродинамических параметров эжектирования воздуха в желобах телескопических погрузчиков

В качестве объекта численных исследований процессов аспирации рассмотрим пример загрузки гранулированного сыпучего материала крупностью  $d_e = 5$  мм и плотностью  $\rho_m = 1800$  кг/м<sup>3</sup> с помощью телескопической загрузочной станции ТЗС 1000 JETPASK. Технологические, конструктивные и аэродинамические исходные данные для расчета:  $G_T = 20$  кг/с;  $H_1 = 4$  м;  $H_0 = 0,5$  м;  $d_1 = 0,36$  м;  $d_2 = 0,3$  м;  $D_H = 0,45$  м;  $\zeta_0 = 1,5$ ;  $\zeta_m = 2,4$ ;  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup>;  $S_{nk} = 0,15$  м<sup>2</sup>;  $P_y = 8$  Па;  $F_a = 0,15$  м<sup>2</sup>;  $\psi_0 = 1,1$ ;  $\rho_m = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_g = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_w = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_e = 5$  мм;  $N_g = 10$ .

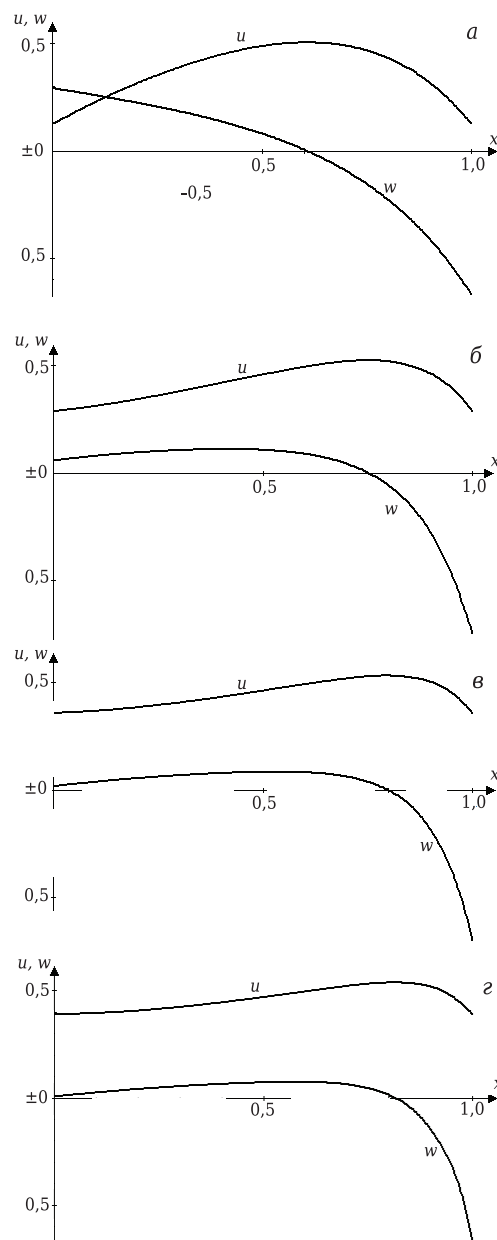
В качестве основного изменяющегося параметра принята степень герметизации верхнего (неаспирируемого) укрытия — площадь неплотностей  $S_{nw}$ . Этот параметр существенным образом сказывается на скорости и, следовательно, на расходе воздуха, эжектируемого в телескопическом желобе и рециркулируемого в байпасной камере не только за счет разрежения  $P_y$ , поддерживаемого в аспирируемом укрытии вентилятором аспирационной установки.

Прежде всего, это наглядно видно при сопоставлении графиков изменения скорости воздуха  $u(x)$  и  $w(x)$  на рис. 2. Максимумы этих скоростей при уменьшении площади неплотностей  $S_{nw}$  смещаются к началу телескопического желоба. Направление перетекающего рециркулируемого воздуха остается прежним: в начальном сечении ( $x = 0$ ) перетекание осуществляется из байпасной камеры в желоб, в конечном ( $x = 1$ ) — из желоба в камеру.

Причем скорость перетекания в начальном сечении увеличивается с повышением степени

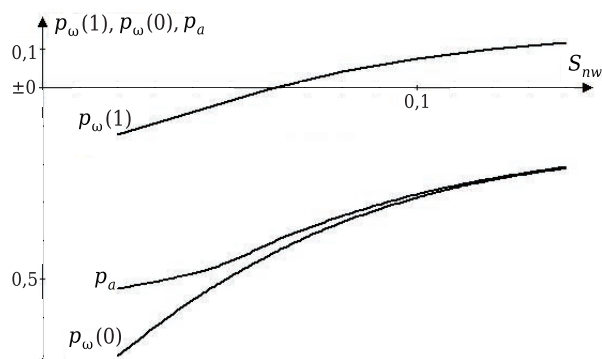
герметизации верхнего укрытия (при  $S_{nw} \rightarrow 0,02$  м<sup>2</sup>). Центр вихря рециркулируемого воздуха смещается к началу желоба. Если центр этого вихря лежит в сечении  $x_m = 0,82$  при  $S_{nw} = 0,14$  м<sup>2</sup>, то при  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup> он перемещается в сечение  $x_m = 0,64$ . Такое смещение объясняется уменьшением к концу желоба действия аэродинамических сил (эжекционного давления) ускоренно падающих частиц перегружаемого материала.

Отмеченное смещение вихря рециркуляции к началу желоба объясняется также ростом разрежения  $p_w(x)$  в начальном сечении байпасной ка-



**Рис. 2.** Изменение безразмерных скоростей эжектируемого воздуха  $u(x)$  и скоростей перетекания воздуха  $w(x)$  через зазоры между секциями желоба по высоте падения частиц ( $x = 0, \dots, 1$ ) при условном диаметре желоба  $D_1 = 0,33$  м,  $D_H = 0,45$  м,  $H_1 = 4$  м,  $Le = 3,542$ ;  $S_{nw}$  равно 0,02 (а), 0,06 (б), 0,1 (в), 0,14 м<sup>2</sup> (г)

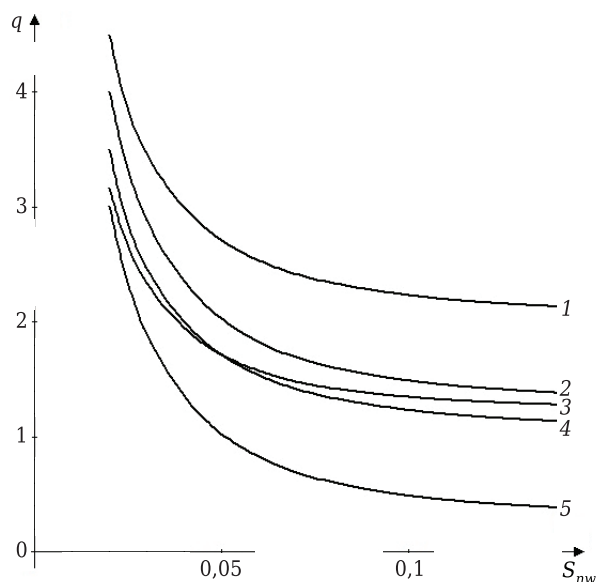




**Рис. 3.** Изменение безразмерных давлений в начале  $p_{\omega}(0)$ , в конце  $p_{\omega}(1)$  камеры и у стенок днища байпасной камеры  $p_a$  при увеличении площади неплотностей  $S_{nw}$  верхнего неаспирируемого укрытия при условном диаметре желоба  $D_1 = 0,33$  м;  $D_n = 0,45$  м;  $H_1 = 4$  м;  $Le = 3,542$

меры  $p_{\omega}(0)$  при снижении площади неплотностей верхнего укрытия (рис. 3), сопровождающего рост к. м. с. этого укрытия (от  $\zeta_{nw} = 0,896$  при  $S_{nw} = 0,14$  м<sup>2</sup> до  $\zeta_{nw} = 43,9$  при  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup>). Причем зона разрежения при малых площадях неплотностей ( $S_{nw} \geq 0,04$  м<sup>2</sup>) захватывает и конечное сечение желоба ( $p_{\omega}(1) = -0,12$  при  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup>).

Естественно, смещение зоны разрежения оказывает влияние не только на геометрию вихревой рециркуляции, но и на мощности (расходы) воздушных течений (рис. 4). Так, резко возрастают расходы рециркулируемого воздуха при сни-

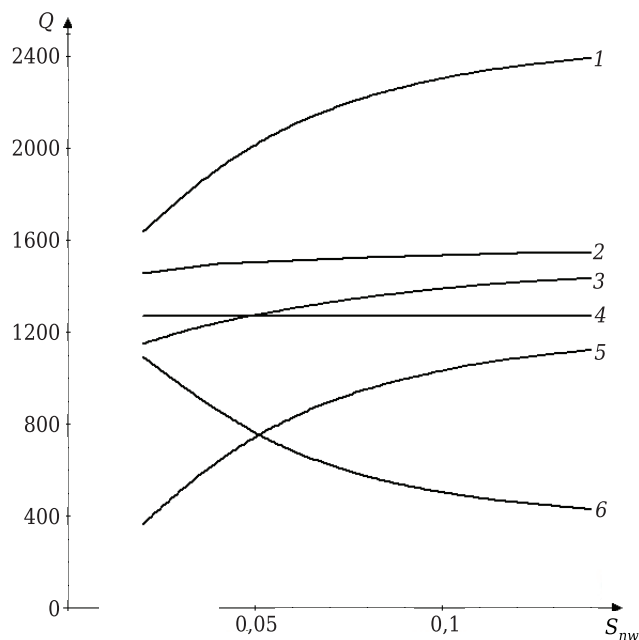


**Рис. 4.** Изменение относительных скоростей  $q$  расходов воздуха: 1 — аспирируемого из нижнего укрытия  $Q_a / Q_1$ ; 2 — максимально эжектируемого по телескопическому желобу  $Q_m / Q_1$ ; 3 — эжектируемого при отсутствии зазоров в стенках желоба  $Q_2 / Q_1$ ; 4 — поступающего через неплотности аспирационного укрытия  $Q_n / Q_1$ ; 5 — рециркулируемого в желобе  $Q_r / Q_1$

жении  $S_{nw}$ : с  $Q_r / Q_1 = 0,4$  при  $S_{nw} = 0,14$  м<sup>2</sup> до  $Q_r / Q_1 = 3,0$  при  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup>. Рост относительного расхода воздуха, поступающего через неплотности нижнего аспирируемого укрытия,  $Q_n / Q_1 = 0,4$  происходит не потому, что изменяется  $Q_n$  (для нашего случая  $Q_n = 1273$  м<sup>3</sup>/ч — const), а потому, что уменьшается расход транзитного воздуха  $Q_1$  с уменьшением  $S_{nw}$  (в силу большого к. м. с.  $\zeta_{nw} = 43,9$ ). По этой причине растет и относительный расход аспирируемого воздуха  $Q_a / Q_1$ , и максимальный расход рециркулируемого воздуха  $Q_m / Q_1$ , и относительный расход эжектируемого воздуха при герметичных стенках желоба  $Q_2 / Q_1$ . Рост упомянутых расходов прежде всего объясняется увеличением расхода рециркулируемого воздуха с  $Q_r = 429$  м<sup>3</sup>/ч при  $S_{nw} = 0,14$  м<sup>2</sup> до  $Q_r = 1094$  м<sup>3</sup>/ч при  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup> (рис. 5) и уменьшением транзитного воздуха с  $Q_1 = 1123$  м<sup>3</sup>/ч при  $S_{nw} = 0,14$  м<sup>2</sup> до  $Q_1 = 364$  м<sup>3</sup>/ч при  $S_{nw} = 0,02$  м<sup>2</sup>.

Сопоставляя абсолютные величины расходов воздуха (рис. 5), можем констатировать, что с увеличением площади неплотностей верхнего укрытия резко изменяются расход рециркулируемого воздуха  $Q_r$  и расход транзитного воздуха в желобе  $Q_1$ . Объемный расход  $Q_r$  снижается более чем в 2 раза, расход  $Q_1$  увеличивается в 3 раза в диапазоне  $S_{nw} = 0,02 \div 0,14$  м<sup>2</sup>.

Расход транзитного эжектируемого воздуха  $Q_1$  за счет рецикла воздуха при перетекании в байпасную камеру заметно ниже, чем расход эжектируемого воздуха в желобе при отсутствии



**Рис. 5.** Изменение абсолютных величин расхода  $Q$ , м<sup>3</sup>/ч, воздуха в зависимости от площади неплотностей верхнего укрытия  $S_{nw}$ , м<sup>2</sup>: 1 — аспирируемого из нижнего укрытия  $Q_a$ ; 2 — максимального расхода воздуха, эжектируемого по телескопическому желобу  $Q_m$ ; 3 — эжектируемого в желобе при герметизации его стенок  $Q_2$ ; 4 — поступающего через неплотности нижнего аспирационного укрытия  $Q_n$ ; 5 — транзитного расхода  $Q_1$ ; 6 — рециркулируемого в желобе  $Q_r$

рецикла воздуха  $Q_2$ , т. е. в случае герметизации стенок желоба, а именно в 2,84–1,16 раза в диапазоне  $S_{nw} = 0,02 \div 0,14 \text{ м}^2$ . В силу этого уменьшается и требуемая производительность местного отсоса  $Q_a$  по сравнению с производительностью местного отсоса от перегрузки по желобу с герметичными стенками  $Q_{2a} = Q_2 + Q_n$  в 1,57–1,08 раза в диапазоне  $S_{nw} = 0,02 \div 0,14 \text{ м}^2$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчета расхода эжектируемого воздуха при перегрузке сыпучего материала телескопическими погрузчиками.

Высокая энергоемкость телескопических аспирационно-технологических установок (АТУ) перегрузочных станций обусловлена эжекционной способностью гравитационных потоков сыпучего материала, нагнетающих в аспирационные укрытия большое количество воздуха, что существенно увеличивает требуемую производительность систем аспирации. Мощность АТУ можно существенно уменьшить применением коаксиально расположенных загрузочных телескопических желобов и гофрированных непроницаемых стенок, расположенных вокруг желоба, а также герметизацией верхних и нижних укрытий, примыкающих к желобам.

## Библиографический список

1. **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. В. Ходаков // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 57–61.
2. **Аверкова, О. А.** Modeling detached flows at the inlet to round suction flues with annular screens / О. А. Аверкова, I. N. Logachev, K. I. Logachev, I. V. Khodakov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 425–429.
3. **Ходаков, И. В.** Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами / И. В. Ходаков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 3. — С. 6–12.
4. **Ходаков, И. В.** Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие / И. В. Ходаков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 2. — С. 11–15.
5. **Нетеон, W. C. L.** Plant and process ventilation / W. C. L. Neteon. — N. Y. : The Industrial Press, 1955. — 352 p.
6. **Серенко, А. С.** Обеспыливание воздуха в огнеупорной промышленности / А. С. Серенко. — М. : Металлургиздат, 1953. — 144 с.
7. **Шелектин, А. В.** Определение объемов воздуха для аспирации оборудования дробильно-сортировочных фабрик / А. В. Шелектин // Борьба с силикозом. — М. : Изд-во АН СССР, 1959. — Т. II. — С. 135–140.
8. **Logachev, I. N.** Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev. — BocaRaton : CRCPress, 2014. — 417 p.

Коаксиально расположенные желоба и байпасные камеры способствуют формированию внутренней рециркуляции эжектируемого воздуха и заметному снижению мощности потока транзитного воздуха, поступающего из желоба в аспирируемое укрытие.

Численные исследования убедительно показали, что основным параметром снижения транзитного расхода эжектируемого воздуха и увеличения объемов рециркулируемого воздуха является степень герметизации верхнего укрытия. Например, при снижении суммарной площади неплотностей этого укрытия от 0,14 до 0,02  $\text{м}^2$  расход транзитного воздуха уменьшится в 3 раза, а рециркулируемого увеличится в 2,5 раза. Общая производительность местного отсоса от нижнего укрытия при этом сократится в 1,68 раза. При отсутствии рецикла воздуха (при герметизации стенок желоба и отсутствии байпасной камеры) требуемая производительность отсоса увеличилась бы в 1,57 раза при хорошей герметизации (площадь неплотностей 0,02  $\text{м}^2$ ).

\* \* \*

Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам РФФИ (проект № 16-08-00074а) и Президента Российской Федерации (проект МД-95.2017.8).

8. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova. — BocaRaton : CRCPress, 2015. — 576 p.
9. **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.
10. **Li Xiaochuan.** Developments in studies of air entrained by falling bulk materials / Li Xiaochuan, Wang Qili, Liu Qi, Hu Yafei // Powder Technology. — 2016. — Vol. 291. — P. 159–169.
11. **Wypych, Peter W.** Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials / Peter W. Wypych, Jianglin Yi // Powder Technology. — 2003. — Vol. 129. — P. 111–121.
12. **Шафран, Ю. В.** Моделирование промышленных вентиляционных систем: проблема создания 3D-модели расчетной области / Ю. В. Шафран, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. — 2016. — № 2 (33). — С. 52–62.
13. **Хоперсков, А. В.** Численное моделирование вентиляционных течений в промышленных помещениях / А. В. Хоперсков, Ю. В. Шафран, М. А. Бутенко // Южно-Сибирский научный вестник. — 2014. — № 2 (6). — С. 98–102. ■

Получено 17.01.17

© О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, И. В. Крюков, 2017 г.