

УДК 533.6:628.5

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ. ЧАСТЬ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ*

Теоретически обосновывается метод снижения энергоемкости аспирационных укрытий за счет организации эффективной рециркуляции воздуха путем перфорации стенок желоба и использования соосной байпасной камеры с учетом торцевого перетекания воздуха между верхним неаспирируемым укрытием и приемной камерой нижнего аспирируемого укрытия.

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

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ И ИХ РЕШЕНИЕ

Вернемся к общей постановке задачи. Оценим, насколько изменится рецикл воздуха с двумя кольцами циркуляции. Для этого линеаризуем исходные уравнения (4) и (5), приняв, что $udu \approx \bar{u}du$; $\omega d\omega \approx \bar{\omega}d\omega$.

Несмотря на столь грубое упрощение с математической точки зрения, получаемые результаты существенно не отличаются от «точных» решений исходной системы нелинейных уравнений. Связано это с тем, что потери давления при движении воздуха в рассматриваемых каналах главным образом определяются местными потерями, а не изменением скоростного давления.

Кроме того, примем линейный закон изменения массовых сил межкомпонентного взаимодействия в потоке сыпучего материала:

$$\text{Le} \cdot \frac{|v-u|(v-u)}{v} \approx \text{Le} \cdot k(v-u); \quad (24)$$

$$k = \left| 1 - \frac{\bar{u}}{v} \right| \approx 1 - \frac{\bar{u}}{v}.$$

Черта над буквой (выражением) по-прежнему обозначает осреднение величины по длине желоба (или байпасной камеры).

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 2 за 2014 г. В данной части статьи продолжается нумерация рисунков и формул с учетом представленных в части 1.



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

Для того чтобы упростить правую часть линейного уравнения, заменим равноускоренный поток материала на ускоренный (условный) поток, скорость которого определяется трехчленом $\bar{v} = b_0 + b_1x + b_2x^2/2$. Тогда усредненная скорость потока частиц

$$\bar{v} = b_0 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{6},$$

$$\text{где } b_0 = n; \quad b_1 = \sqrt{8(1+n^2)} - 3n - 1; \quad b_2 = 4(1+n - \sqrt{2(1+n^2)}).$$

Что касается потерь давления в перфорационных отверстиях стенок желоба, положим, что они зависят линейно (а не квадратично) от скорости

$$p_\omega - p_u = \zeta_0 |\bar{w}| w,$$

где $|\bar{w}|$ — усредненная абсолютная величина скорости перетекаемого воздуха в отверстиях; ζ_0 — коэффициент местных сопротивлений (к. м. с.) отверстия, принимаемый, как правило, $\zeta_0 = 2,4$, как для отверстия в бесконечно тонкой стенке. В силу (6) последнее соотношение можем записать в виде

$$p_\omega - p_u = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} \frac{du}{dx}. \quad (25)$$

После принятых упрощений исходные уравнения (4) и (5), с учетом соотношения между скоростями (2)

$$\omega = \frac{u-z}{r}; \quad \bar{\omega} = \frac{\bar{u}-z}{r},$$

запишем в виде системы

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_\omega}{dx} + 4 \frac{\bar{u}-z}{r} \frac{du}{dx} &= 0; \\ \frac{dp_u}{dx} + 4 \bar{u} \frac{du}{dx} &= k \text{Le}(v-u). \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Вычитая второе уравнение этой системы из первого, получим уравнение

$$\frac{d(p_\omega - p_u)}{dx} - 4\left(\bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r}\right) \frac{du}{dx} + kLe \cdot u = kLe \cdot v,$$

которое с учетом выражения (25) сводится к линейному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$A = 2\left(\bar{u} - \frac{\bar{u} - z}{r}\right) \frac{E}{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}; \quad (27)$$

$$B = k \frac{Le \cdot E}{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}.$$

Таким образом, общая задача с комбинированным байпасированием перфорированного желоба перегрузочного узла сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u'' - 2Au' - Bu &= -Bv, \\ dp_\omega + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} dw &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

с краевыми условиями (7)–(12).

Решение первого уравнения этой системы имеет вид:

$$u = C_1 e^{a_1 x} + C_2 e^{a_2 x} + v - k_1 - k_2 x, \quad (29)$$

$$u' = C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 + b_2 x - k_2, \quad (30)$$

где

$$k_2 = 2b_2 \frac{A}{B}; \quad k_1 = 2 \frac{A}{B} (b_1 - k_2) - b_2/B;$$

$$a_1 = A + \sqrt{A^2 + B}; \quad a_2 = A - \sqrt{A^2 + B}.$$

Для определения констант интегрирования C_1 и C_2 воспользуемся краевыми условиями для скорости (7) и (9):

$$\left. \begin{aligned} u_n &= C_1 + C_2 + n - k_1, \\ u_k &= C_1 e^{a_1} + C_2 e^{a_2} + 1 - k_1 - k_2. \end{aligned} \right\}$$

Имеем:

$$C_1 = \frac{m_2 - m_1 e^{a_2}}{e^{a_1} - e^{a_2}}; \quad C_2 = \frac{m_1 e^{a_1} - m_2}{e^{a_1} - e^{a_2}},$$

где

$$m_1 = u_n - n + k_1; \quad m_2 = u_k - 1 + k_1 + k_2.$$

Используя уравнение (25), с учетом выражения (29) получим соотношение

$$p_\omega - p_u = \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1 x} + C_2 a_2 e^{a_2 x} + b_1 + b_2 x - k_2),$$

позволяющее на основании первых уравнений краевых условий для давлений (11) и (12) составить систему равенств:

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} + \zeta_{un} u_n^2 &= \frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 + C_2 a_2 + b_1 - k_2); \\ \zeta_{\omega k} \frac{(u_k - z)^2}{r^2} + \zeta_{uk} u_k^2 &= -\frac{|\bar{w}| \sqrt{\zeta_0}}{E} (C_1 a_1 e^{a_1} + C_2 a_2 e^{a_2} + b_1 - k_2 + b_2). \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Для замыкания полученной системы из двух уравнений с тремя неизвестными u_n , u_k и z воспользуемся вторым дифференциальным уравнением системы (28). Интегрируя это уравнение по всей длине каналов, получим следующее соотношение:

$$p_\omega(1) - p_\omega(0) + 4 \frac{\bar{u} - z}{r^2} (u_k - u_n) = 0,$$

которое с учетом вторых уравнений краевых условий для давлений (11) и (12), а также соотношений (13) и (14), позволяет получить третье уравнение

$$p_y + \zeta_n z^2 + 4 \frac{u_n - z}{r^2} (u_k - u_n) = \zeta_{\omega k} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} - \zeta_{\omega n} \frac{(u_n - z)^2}{r^2} = 0; \quad (32)$$

$$\zeta_{n1}^* = \zeta_1^* + \zeta_p^* = \zeta_1 \left(\frac{S_u^{\%}}{f_1^{\%}} \right)^2 + \zeta_p \left(\frac{S_u^{\%}}{f_p^{\%}} \right)^2,$$

замыкающее систему (31).

Для решения системы уравнений (32) и (31) необходимо найти осредненные скорости воздуха, эжектируемого ($\bar{u}$), рециркулируемого ($\bar{\omega}$) и перетекающего через перфорационные отверстия $|\bar{w}|$. Для определения осредненной скорости эжектируемого воздуха $\bar{u}$ следует выполнить интегрирование второго уравнения «упрощенной» системы (26) по всей длине желоба. Имеем:

$$p_u(1) - p_u(0) + 4\bar{u}(u_k - u_n) = Le(\bar{v} - \bar{u})^2/\bar{v},$$

или с учетом краевых условий для давлений

$$\zeta_{uk} u_k^2 + \zeta_{un} u_n^2 + \zeta_n z^2 + p_y + 4\bar{u}(u_k - u_n) = Le \frac{(\bar{v} - \bar{u})^2}{\bar{v}},$$

откуда найдем следующее соотношение для z :

$$z = \sqrt{\frac{kLe(\bar{v} - \bar{u}) - F_y}{\zeta_n^*}}, \quad (33)$$

где для удобства записи принято

$$F_y = \zeta_{uk} u_k^2 + \zeta_{un} u_n^2 + p_y + 4\bar{u}(u_k - u_n).$$

Используем результаты решения «точной» задачи с одним циркуляционным кольцом, т. е. положим в качестве первого приближения

$$\bar{u} = u_c, \quad \bar{\omega} = \omega_c,$$

где u_c и ω_c определяются уравнениями (22) после решения уравнения (21) относительно параметра z_c .

Осреднение абсолютной величины скорости перетекания $|\bar{w}|$ будем осуществлять по значению этой величины в трех точках по длине желоба. Учитывая, что скорость w знакопеременна, можем записать

$$|\bar{w}| \approx \frac{|w(0)| + |w(1)|}{3},$$

где в силу краевых условий (8) и (10), (11) и (12), а также учитывая (2),

$$|w(0)| = \sqrt{\zeta_{\omega n} \left(\frac{u_n - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{un}}{\zeta_0} u_n^2};$$

$$|w(1)| = \sqrt{\frac{\zeta_{\omega k} \left(\frac{u_k - z}{r} \right)^2 + \frac{\zeta_{uk}}{\zeta_0} u_k^2}.$$

Остановимся на более простом варианте — решим систему (31) с подстановкой уравнения (33), приняв в качестве первого приближения усредненной скорости $\bar{u}$ среднеарифметическое значение скорости эжектируемого воздуха в трех точках $x = 0, x = x_m, x = 1$:

$$\bar{u} = \frac{u_n + u_m + u_k}{3}, \quad (34)$$

где $u_m \approx u_c$.

После решения системы (31), определив u_n и u_k , найдем расчетную величину усредненной скорости по формуле

$$\bar{u}_r = \bar{v} + \frac{C_1}{a_1} (e^{a_1} - 1) + \frac{C_2}{a_2} (e^{a_2} - 1) - k_1 - 0,5k_2, \quad (35)$$

полученной интегрированием функции (28) в интервале $0 \leq x \leq 1$. Сопоставим эти величины и осуществим при необходимости следующее приближение, приняв

$$\bar{u} \approx \bar{u}_r, \quad (36)$$

или найдем максимальное значение u_m решением системы (29) и (30) (приняв $u = u_m, x = x_m, u' = 0$), а затем определим величину $\bar{u}$ по формуле (34). Мы приняли метод последовательных приближений с использованием соотношений (35) и (36).

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО БАЙПАСИРОВАНИЯ

Результаты исследований на конкретном примере перегрузочного узла с комбинированным байпасированием показали, что при наличии двух рециркуляционных колец (внешнего транзитного относительно байпасной камеры восходящего потока — 1-е кольцо и внутреннего восходящего потока воздуха в байпасной камере, перетекающего через отверстия стенок из этой камеры в желоб в верхней части и истекающего из желоба в нижней части — 2-е кольцо) расход рециркулируемого воздуха растет, а расход воздуха, нагнетаемого (транзитная часть расхода воздуха в желобе относительно системы верхнее укрытие — желоб — нижнее укрытие) из приемной камеры в нижнее аспирируемое укрытие, уменьшается (рис. 5). Это легко заметить, сравнивая графики изменения коэффициентов рециркуляции R_{z1}, R_{z2} и расходов нагнетаемого воздуха Q_1 и Q_2 . С увеличением эжектирующей способности потока перегружаемого материала, т. е. с ростом числа Le , это отличие становится более заметно. В случае $Le = 0,6$ при отсутствии байпасирования расход нагнетаемого воздуха в абсолютном выражении составил $Q_0 = 0,66 \text{ м}^3/\text{с}$, при наличии только одного кольца рециркуляции этот расход снизился до $Q_1 = 0,49 \text{ м}^3/\text{с}$ (на 26 %) и при нали-

чии двух колец — до $Q_2 = 0,37 \text{ м}^3/\text{с}$ (уменьшается в 1,78 раза).

Эти величины при $Le = 3$ соответственно составят $Q_0 = 1,03 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ (на 42 % меньше); $Q_2 = 0,24 \text{ м}^3/\text{с}$ (меньше в 4,29 раза по сравнению с величиной Q_0).

Столь существенное снижение расходов нагнетаемого воздуха Q_1 (а следовательно, и заметное снижение расходов удаляемого воздуха Q_a) объясняется ростом противодавлений в укрытиях (рис. 6) при увеличении Le . Прежде всего заметно увеличивается разрежение в верхнем укрытии $p_{1(1)}$ и снижается разрежение в приемной камере нижнего укрытия $p_{2(1)}$, что стимулирует увеличение расхода рециркулируемого воздуха при росте $\Delta p_{21(1)}$.

При использовании двух колец рециркуляции происходит увеличение рецикла воздуха за счет интенсификации его перетекания через перфорационные отверстия при росте числа эжекции Le . Несмотря на рост разрежения в приемной камере $p_{2(2)}$ и связанное с ним снижение противодавления $\Delta p_{21(1)}$, величина рецикла увеличивается. Это объясняется повышением эжектирующей способности потока перегружа-

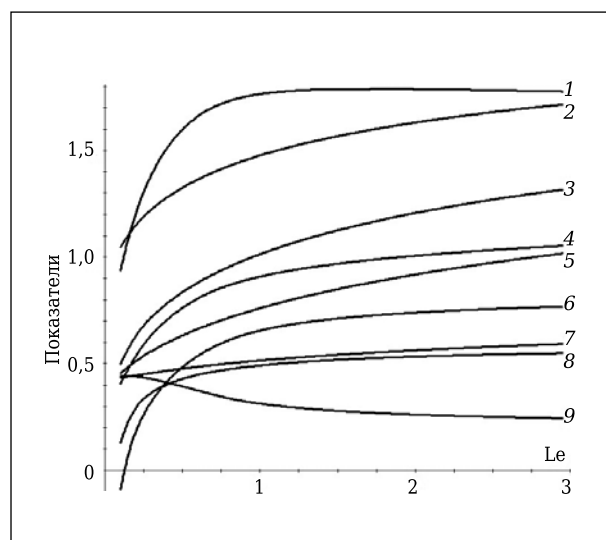


Рис. 5. Изменение расходов эжектируемого воздуха, нагнетаемого в нижнее аспирируемое укрытие из приемной камеры при одном циркуляционном кольце Q_1 , при двух циркуляционных кольцах Q_2 и при отсутствии этих колец Q_0 ; расходов эжектируемого воздуха Q_{u1} при одном кольце, Q_{u2} при двух циркуляционных кольцах и Q_{u0} при отсутствии колец циркуляции; отношение этих расходов $q_0 = Q_{u0} / Q_1$, $q_{02} = Q_{u2} / Q_1$, а также коэффициентов рециркуляции воздуха $R_{z1} = (Q_{u1} - Q_1) / Q_{u1}$; $R_{z2} = (Q_{u2} - Q_2) / Q_{u2}$ в зависимости от величины числа эжекции Le при $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\varepsilon = 0,25$, $\zeta_0 = \zeta_1 = \zeta_p = 2,4$, $\zeta_{un} = 0,5$, $\zeta_{uk} = 1,0$, $\zeta_u = \zeta_{\omega} = 1,5$, $\zeta_{\omega n} = \zeta_{\omega k} = 0,75$, $f_1 = f_p = S_u = S_{\omega} = 0,3 \text{ м}^2$, $n = 0,3$, $v_k = 10 \text{ м/с}$, $P_3 = -6 \text{ Па}$, $P_y = -0,1$, $\zeta_1^* = \zeta_p^* = 2,4$, $\zeta_n^* = 4,8$: 1 — $q_2 = Q_{u2} / Q_1$; 2 — $q_0 = Q_{u0} / Q_1$; 3 — Q_{u1} ; 4 — Q_{u2} ; 5 — Q_{u0} ; 6 — R_{z2} ; 7 — Q_1 ; 8 — R_{z1} ; 9 — Q_2

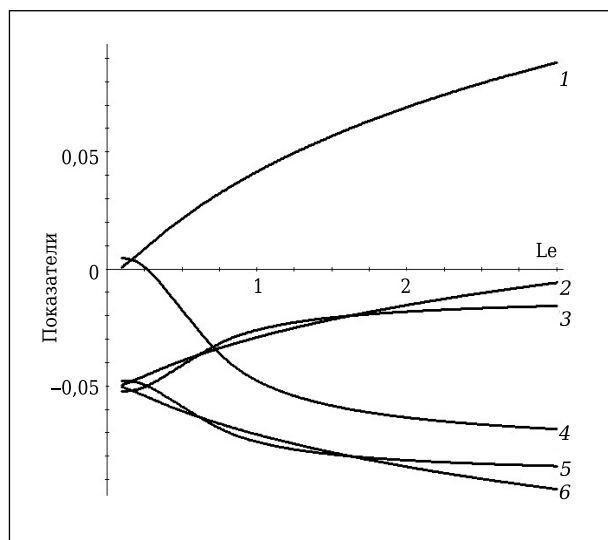


Рис. 6. Изменение избыточных статических давлений воздуха в верхнем (неаспирируемом) укрытии $p_{1(1)}$ при одном циркуляционном кольце и $p_{1(2)}$ при двух кольцах, а также в приемной камере нижнего аспирируемого укрытия $p_{1(2)}$ при одном кольце и $p_{2(2)}$ при двух кольцах и разности этих давлений $\Delta p_{21(1)} = p_{2(1)} - p_{1(1)}$, $\Delta p_{21(2)} = p_{2(2)} - p_{1(2)}$ в зависимости от величины Le (при тех же исходных данных, что на рис. 5)

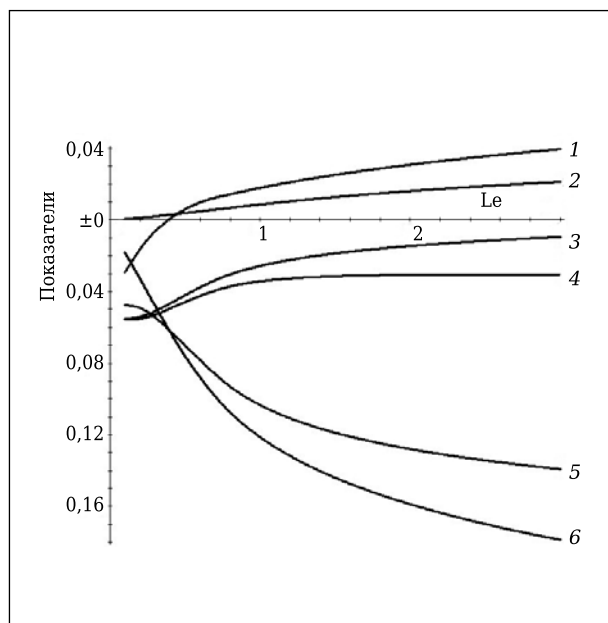


Рис. 7. Изменение избыточных статических давлений воздуха на концах желоба: $p_u(0)$ (кривая 4) — при входе эжектируемого воздуха в желоб, $p_u(1)$ (кривая 1) — при выходе его из желоба; на концах байпасной камеры: $p_{\omega}(0)$ (кривая 3) — при выходе рециркулируемого воздуха из камеры в верхнее укрытие, $p_{\omega}(1)$ (кривая 5) — при входе в укрытие, а также разность этих давлений $\Delta p(0) = p_{\omega}(0) - p_u(0)$ (кривая 2) и $\Delta p(1) = p_{\omega}(1) - p_u(1)$ (кривая 6) в зависимости от числа Le (при тех же исходных данных, что на рис. 5)

емого материала при росте параметра Le . Возрастают избыточные давления (рис. 7) в желобе $p_u(0)$ и байпасной камеры $p_{\omega}(0)$, а также растут по абсолютной величине разности давлений $\Delta p(0)$ и $\Delta p(1)$, что способствует увеличению расхода рециркулируемого воздуха.

При увеличении числа Le растут как продольные скорости эжектируемого и рециркулируемого воздуха (рис. 8), так и скорости перетекания воздуха (рис. 9).

Существенная роль в снижении величины нагнетаемого воздуха Q_1 принадлежит герметизации верхнего укрытия (увеличивается p_1) и снижению площади зазора между конвейерной лентой и стенками приемной камеры (растет p_2).

Таким образом, устройство комбинированной камеры с транзитным обменом воздуха между верхним неаспирируемым укрытием и приемной камерой нижнего аспирируемого укрытия (см. рис. 1) повышает энергосберегающий эффект. Расход нагнетаемого в аспирируемое укрытие эжектируемого воздуха Q_1 можно

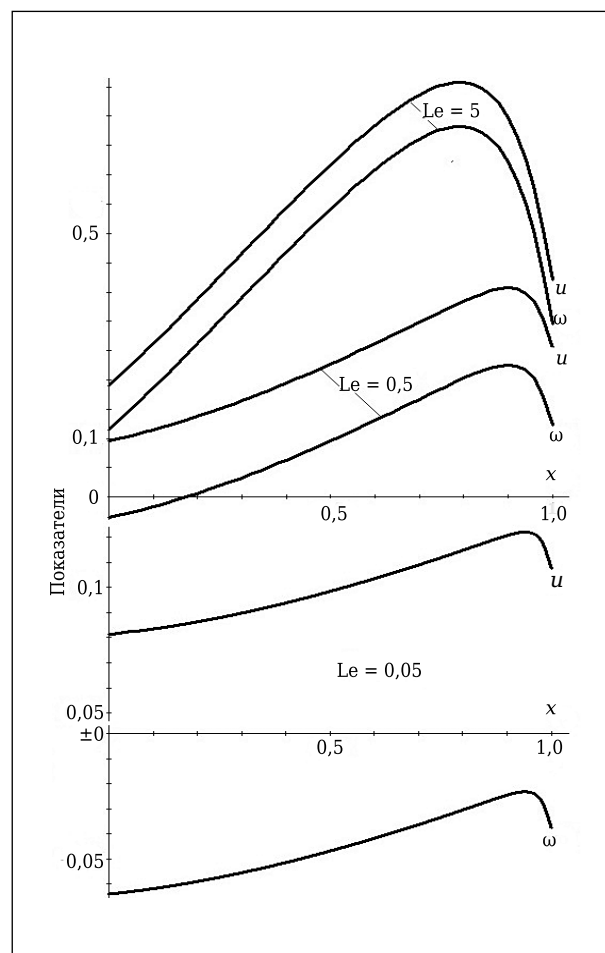


Рис. 8. Изменение безразмерных скоростей эжектируемого воздуха в желобе u и рециркулируемого восходящего потока воздуха в байпасной камере ω по высоте падения частиц перегружаемого сыпучего материала (при тех же исходных данных, что на рис. 5)

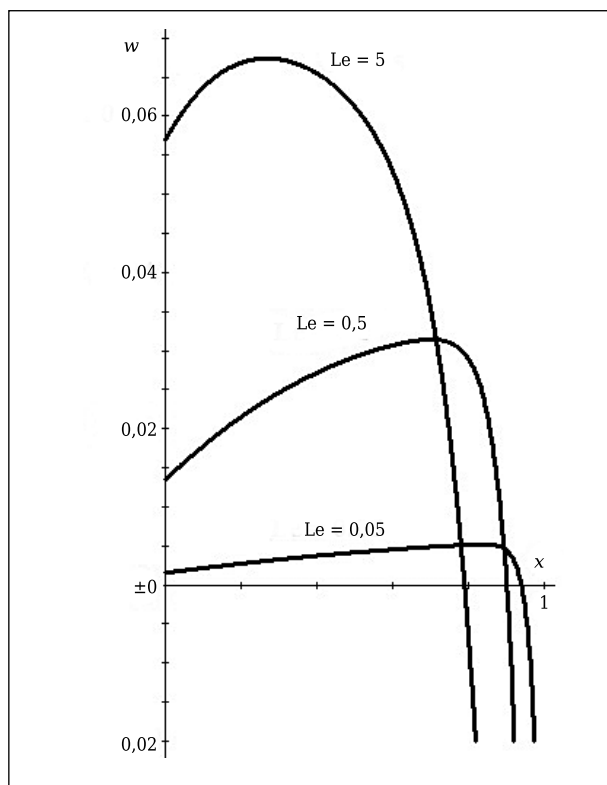


Рис. 9. Изменение безразмерной скорости перетекания рециркулируемого воздуха из байпасной камеры через перфорационные отверстия по высоте желоба (при тех же исходных данных, что на рис. 5)

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 ($Le = 0,6$) даже при одном внутреннем кольце рециркуляции расход нагнетаемого воздуха был снижен в 1,35 раза по сравнению с перегрузкой этого же потока материала в желобе с непроницаемыми стенками и отсутствием байпасной камеры, а при двойном кольце рециркуляции — в 1,78 раза (см. рис. 5). При больших числах эжекции эффект снижения расхода Q_1 еще выше. Так, при $Le = 3$ и одном внешнем кольце циркуляции этот же расход при том же сопоставлении (с Q_{u0}) был уменьшен в 1,72 раза, а с двумя кольцами — в 4,29 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). ■

Получено 14.01.14

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ТЕРМООБРАБОТКА

Восьмая международная специализированная выставка

9 - 11 сентября 2014
Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 5

Единственная в России выставка термического оборудования и технологий

9-10 сентября Международная конференция «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ»

Разделы выставки:

- новый раздел Внепечная местная и объёмная термообработка
- Промышленные печи: муфельные, вакуумные, плавильные, шахтные, камерные, электропечи
- Индукционный нагрев: генераторы индукционных токов, индукционные плавильные печи
- Оборудование для химико-термической обработки: азотирования, цементации и т.д.
- Размерная и поверхностная обработка: формообразование, напыление
- Лабораторные печи, сушильные шкафы
- Оснастка для термического оборудования
- Системы нагрева и газоснабжения, горелки, электронагревательные элементы
- Неразрушающий контроль, испытательное оборудование, измерительные системы
- Автоматизация термообработки, системы управления и регулирования
- Энергосберегающие технологии термических производств
- Диагностика, реконструкция и модернизация оборудования
- Закалочное оборудование, масла и среды

новый раздел **Футеровка печей:** огнеупоры, теплоизоляция, клеи, футеровочные работы

Информационная поддержка:

Организатор: **ООО «Выставочная компания «Мир-Экспо»** | Россия, 115533, Москва, проспект Андропова, 22
Тел./факс: 8 499 618 05 65, 8 499 618 36 83
E-mail: info@htexporus.ru | Сайт: www.htexporus.ru | Твиттер: @htexpo_ru